

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

Návrh 3D tiskárny s paralelní kinematikou  
Design of 3D Printer with Parallel Kinematics

Student:

Bc. Antonín Durna

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Kubín, Ph.D.

Ostrava 2016

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Antonín Durna**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 70 Zemní, těžební a stavební stroje  
Téma: **Návrh 3D tiskárny s paralelní kinematikou**  
**Design of 3D Printer with Parallel Kinematics**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Navrhněte 3D tiskárnu s paralelní kinematikou, která pracuje na principu modelování pomocí tavené depozice (FDM). Pracovní prostor tiskárny bude mít kruhovou základnu o průměru 265 mm a výšku tisku 380 mm. Rychlost tisku bude 300 milimetrů za sekundu. Konstrukci navrhněte s vyměnitelnou hlavou pro možnost použití tiskárny jako CNC gravírovací zařízení. Zpracujte podrobný 3D model a výkresovou dokumentaci (rozsah upřesní vedoucí práce). Vytipujte kritické uzly a zkontrolujte je výpočtem.

### Seznam doporučené odborné literatury:

KALAB, K. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části spojovací*. 1. vydání VŠB-TU Ostrava, 2007, 91s. ISBN 978-80-248-1290-8  
KALAB, K. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části pohonu strojů*. 1. vydání VŠB-TU Ostrava, 2007, 91s. ISBN 978-80-248-1860-3  
DEJL, Z. *Konstrukce strojů a zařízení I. Spojovací části strojů. Návrh. Výpočet. Konstrukce*. Montanex a.s. Ostrava, 2000, ISBN 80-7225-018-3  
MORAVEC, V., HAVLÍK, J. *Výpočet a konstrukce strojních dílů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0878-1  
NĚMČEK, M. *Řešené příklady ČaMS Spoje*. 2.v. Skripta VŠB-TUO, 2008, ISBN 978-80-248-1782-8

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Kubín, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015  
Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 16.5. 2016 .....


..... *Durma* .....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5.2016

  
.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Antonín Durna

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ostrožská, 300  
Veselí nad Moravou, 69801

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DURNA, Antonín. Návrh 3D tiskárny s paralelní kinematikou : *diplovová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2016, 68 s. Vedoucí práce: Kubín, T.

Diplomová práce se zabývá konstrukcí 3D tiskárny s paralelní kinematikou a možností výměny pracovní hlavy pro gravírování desek plošných spojů. Tiskárna pracuje na principu modelování pomocí tavené depozice (FDM). Průběh teplot ohřevu trysky a vyhřívaného bloku byl experimentálně určen, stejně tak i odpor materiálu při průchodu tryskou. V práci jsou vypracovány jednotlivé uzly 3D tiskárny, provedena MKP analýza tiskové trysky a návrh pohonu. Byl vytvořen 3D model a výkresová dokumentace.

## ANOTATION OF MASTER THESIS

DURNA, Antonín. *Design of 3D printer with parallel kinematics : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2016, 68 p. Thesis head: Kubín, T.

This thesis deals with the construction of a 3D printer with parallel kinematics and with options of exchange of operating head for engraving printed circuit boards. The printer works by means of fused deposition modeling (FDM). The process of increasing temperatures of the nozzle and the heated block was determined experimentally, as well as resistance of the material passing through the nozzle. In the thesis individual nodes of the 3D printer were designed, a FEM analysis of print nozzle was performed and a design of drive was projected. The 3D model and drawings were created.

# Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. METODY A TECHNOLOGIE 3D TISKU.....</b>	<b>12</b>
1.1 RAPID PROTOTYPING .....	12
1.2 STEREOLITOGRAFIE (SLA).....	13
1.3 SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SPÉKÁNÍ (SLS, <i>SELECTIVE LASER SINTERING</i> ) .....	13
1.4 MODELOVÁNÍ POMOCÍ TAVENÉ DEPOZICE (FDM, <i>FUSED DEPOSITION MODELING</i> ).....	14
<b>2. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ KINEMATICKÝCH STRUKTUR .....</b>	<b>15</b>
2.1 KARTÉZSKÁ .....	15
2.2 S PARALELNÍ KINEMATIKOU (DELTA) .....	15
2.3 POLÁRNÍ.....	16
<b>3. JEDNOTLIVÉ UZLY NAVRŽENÉ TISKÁRNY.....</b>	<b>17</b>
<b>4. NÁVRH EFEKTORU .....</b>	<b>18</b>
4.1 NÁVRH HLAVY PRO 3D TISK.....	18
4.1.1 Návrh sestavy trysky .....	19
4.1.2 MKP analýza trysky .....	20
4.1.3 Návrh extruderu .....	26
4.2 NÁVRH HLAVY PRO GRAVÍROVÁNÍ.....	28
4.2.1 Deska plošných spojů.....	28
4.2.2 Návrh vřetene .....	29
4.3 TĚLO EFEKTORU .....	31
<b>5. ODVOZENÍ ZÁKLADNÍCH ROVNIC PRO PARALELNÍ KINEMATIKU .....</b>	<b>33</b>
5.1 ODVOZENÍ ROVNIC KINEMATIKY .....	33
5.2 ODVOZENÍ ROVNIC DYNAMIKY .....	35
5.2.1 Statické hledisko.....	36
5.2.2 Kinematické hledisko .....	37
5.2.3 Dynamické hledisko .....	38
<b>6. NÁVRH RÁMOVÉ KONSTRUKCE A HLAVNÍCH UZLŮ .....</b>	<b>39</b>
6.1 NÁVRH RÁMU .....	39
6.2 NÁVRH HNACÍCH RAMEN A LINEÁRNÍHO VEDENÍ .....	40
6.3 NÁVRH A VÝPOČET POHONU EFEKTORU .....	42
6.3.1 Výpočet minimálních požadavků pohonu.....	42
6.3.2 Návrh pohonu.....	45
6.4 NÁVRH PRACOVNÍHO STOLU .....	47
6.4.1 Návrh vyhřívané desky.....	48
6.4.2 Návrh gravírovacího stolu .....	49

<b>7. DESIGN TISKÁRNY .....</b>	<b>50</b>
<b>8. ELEKTRONIKA.....</b>	<b>51</b>
<b>9. MĚŘENÍ .....</b>	<b>53</b>
9.1 MĚŘENÍ OHŘEVU TRYSKY .....	53
9.2 MĚŘENÍ OHŘEVU TOPNÉHO TĚLESA.....	54
9.3 MĚŘENÍ PRŮBĚHU TEPLoty CHLADIČE.....	55
9.4 MĚŘENÍ ODPORU MATERIÁLU PŘI PRŮCHODU TRYSKOU .....	57
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>64</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

$F_a$	[N]	Reakční síla jednoho ramene
$F_{ae}$	[N]	Reakční síla efektoru
$F_G$	[N]	Tíhová síla jednoho ramene
$F_{GT}$	[N]	Tíha ramene
$F_{Ge}$	[N]	Tíhová síla efektoru
$J_C$	[kg.m <sup>2</sup> ]	Celkový moment setrvačnosti
$J_K$	[kg.m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti kladky
$J_{\check{R}}$	[kg.m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti řemenice
$L_{MIN}$	[m]	Minimální délka vedení
$L_N$	[m]	Délka ramene v půdorysu
$L_R$	[m]	Délka ramene
$M_P$	[Nm]	Potřebný moment extruderu
$M_{V+}$	[Nm]	Moment motoru zvedání vozíku
$M_{V-}$	[Nm]	Moment motoru spouštění vozíku
$M_{MD}$	[Nm]	Potřebný dynamický moment motoru
$M_{MS}$	[Nm]	Potřebný statický moment motoru
$M_{MSG}$	[Nm]	Statický moment motoru pro gravírování
$M_{MDG}$	[Nm]	Dynamický moment motoru pro gravírování
$M_{MST}$	[Nm]	Statický moment motoru pro 3D tisk
$M_{MDT}$	[Nm]	Dynamický moment motoru pro 3D tisk
$Q_O$	[J]	Odebrané teplo filamentem
$R_F$	[m]	Poloměr efektoru
$R_T$	[N]	Odpor materiálu v trysce
$a$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení
$a_b$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení bodu B
$c$	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita



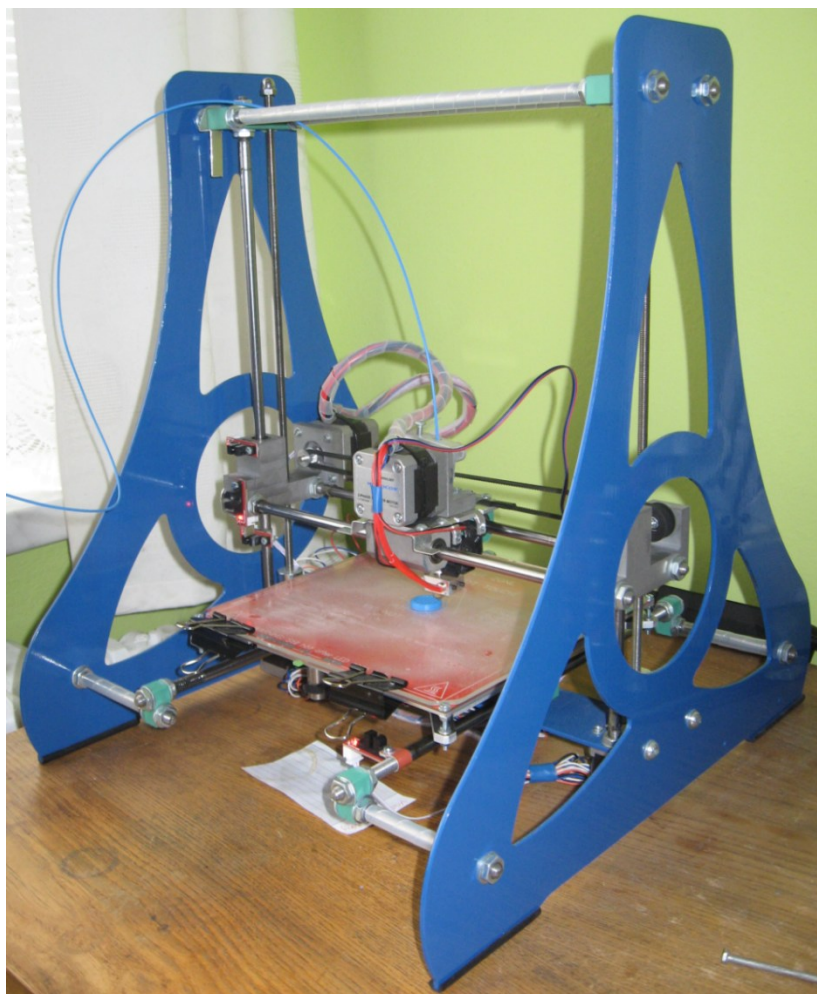
$d_f$	[m]	Průměr filamentu
$d_p$	[m]	Dráha vozíku při změně souřadnic
$d_{pcelk}$	[m]	Celkový rozjezd vozíku
$d_{pmax}$	[m]	Maximální rozjezd vozíku
$d_{pmin}$	[m]	Minimální rozjezd vozíku
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$h_f$	[m]	Délka vytlačeného filamentu
$h_{MAX}$	[m]	Minimální zdvih vozíku
$h_p$	[m]	Původní výška vozíku
$i$	[-]	Převodový poměr planetové převodovky
$k_Z$	[kroků.mm <sup>-1</sup> ]	Počet kroků osy Z
$m$	[kg]	Hmotnost
$m_G$	[kg]	Hmotnost efektoru s hlavou pro gravírování
$m_T$	[kg]	Hmotnost efektoru s hlavou pro tisk
$m_{GT}$	[kg]	Hmotnost ramene
$m_V$	[kg]	Hmotnost vozíku
$m_f$	[kg]	Hmotnost filamentu
$n_E$	[s <sup>-1</sup> ]	Otáčky extruderu
$n_{ME}$	[s <sup>-1</sup> ]	Otáčky motoru extruderu
$r_P$	[m]	Poloměr podávacího kolečka
$r_{\dot{R}}$	[m]	Poloměr pohonné kladky
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost
$v_B$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost bodu B
$v_P$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost proudění vzduchu ve ventilátoru
$x$	[m]	Souřadnice
$y$	[m]	Souřadnice
$x_F$	[m]	Vzdálenost od osy efektoru ke středu ramene
$y_F$	[m]	Vzdálenost od osy efektoru ke středu ramene

$x'$	[m]	Vzdálenost od počátku souřadného systému
$y'$	[m]	Vzdálenost od počátku souřadného systému
$Z_M$	[m]	Vzdálenost na jeden celý krok
$Z_{min}$	[m]	Vzdálenost na jeden mikrokrok
$\alpha$	[°]	Úhel sklonu ramene
$\varepsilon_M$	[rad. s <sup>-1</sup> ]	Úhlové zrychlení motoru
$\eta_C$	[-]	Celková účinnost
$\eta_L$	[-]	Účinnost ložisek
$\eta_P$	[-]	Účinnost řemenového převodu
$\eta_V$	[-]	Účinnost lineárního vedení
$\rho_f$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota filamentu

## Úvod

O 3D tiskárny se zajímám už nějakou dobu. Nejprve jsem jim nevěnoval tolik pozornosti, ale později mě zaujali více. Po zhodnocení jak finanční, tak i technické náročnosti jsem se rozhodl postavit tiskárnu vlastní. S technickým zázemím jsem zvolil a navrhl vlastní konstrukci (obr. 1). Tiskárnu využívám spíše jako experimentální přístroj, na kterém provádím stále nějaké úpravy. Celkově jsem získal díky tomuto projektu hodně zkušeností jak z konstrukce, seřizování, tak i z řízení pohonu pomocí krokových motorů a elektroniky celkově.

Později mě zaujala koncepce tiskárny s paralelní kinematikou. Díky svému sdruženému pohonu může dosáhnout vyšších rychlostí, a tak kratších výrobních časů. Pohyb efektoru má lepší dynamiku a při změně pohybu nevytváří takové rázy jako kinematika kartézská. Nevýhodou je bowdenové vedení materiálu, které neumožňuje tisk flexibilních materiálů, také jeho seřízení je náročnější.



Obr. 1 tiskárna vlastní konstrukce

# 1. Metody a technologie 3D tisku

## 1.1 Rapid prototyping

Rapid prototyping je skupina technologií pro rychlou výrobu dílů. Jejím cílem je vytvoření modelu z počítačových dat v co nejkratším čase a v co nejvyšší kvalitě. Tato technologie umožňuje již při návrhu součásti odzkoušet funkčnost vyvíjeného výrobku, design a ergonomii. Takto vyrobený model se může svými vlastnostmi blížit k finálnímu výrobku nebo ho dokonce nahradit. Může se jednat o menší počet kusů nebo součástí, které se nedají konvenčními technologiemi vyrobit (např. formy s uzavřenými dutinami).

Základem je tvorba 3D geometrického objektu vytvořeného pomocí programu CAD nebo 3D skeneru. Ten je nejčastěji ve formátu STL upraven pomocí speciálního softwaru. Objekt je rozdělen na vrstvy a také upraven podle požadavků tisku. Následně je vygenerován G-kód pro řízení tiskárny. Ta poté tvoří trojrozměrný objekt kladením vrstev, které jsou ve své podstatě příčným řezem dané součásti. Velikost vrstev se může pohybovat v setinách až desetinách milimetru.

Přes všechny pokroky a vývoj mají aditivní technologie svá omezení a to jak přesnost a jakost výrobku tak i výsledný povrch či mechanické vlastnosti, zatím co konvenční metody omezení v takové míře nemají. Výhodou je však použití převážně v prototypové výrobě, kdy není zapotřebí takových nákladů jak finančních, tak časových na výrobu zkouškových kusů (například ergonomie, aerodynamický tvar, design). [1]

### **Jednotlivé technologie 3D tisku:**

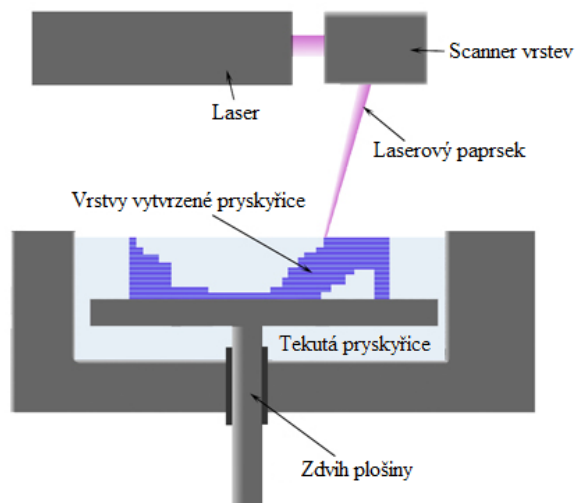
- SLA
- SLS
- ZCORP
- LOM
- FDM
- MULTI JET MODELING
- THERMOPLASTIC INKJET WITH MILLING
- DIGITAL LIGHT PROJECTION

Z toho nejpoužívanější technologie 3D tisku jsou:

## 1.2 Stereolitografie (SLA)

Tato technologie využívá nádobu tekuté ultrafialově vytvrditelné fotopolymerové pryskyřice a UV laser na stavbu vrstev objektu, který je tvořen vrstvou po vrstvě. Pro každou vrstvu, laserový paprsek sleduje příčný řez části tisknutého objektu na povrchu tekuté pryskyřice. Působením ultrafialového záření laserového světla vytvrzuje a zpevní obrazec a dále pokračuje po vrstvách (řezech) součásti a vytvrzuje pryskyřici.

Poté co byl obrazec vytvrzen, klesá nádoba s pryskyřicí o tloušťku jedné vrstvy, typicky 0,05 mm až 0,15 mm. Řez je poté potažen znova vrstvou pryskyřice, která je taktéž vytvrzena. [2]

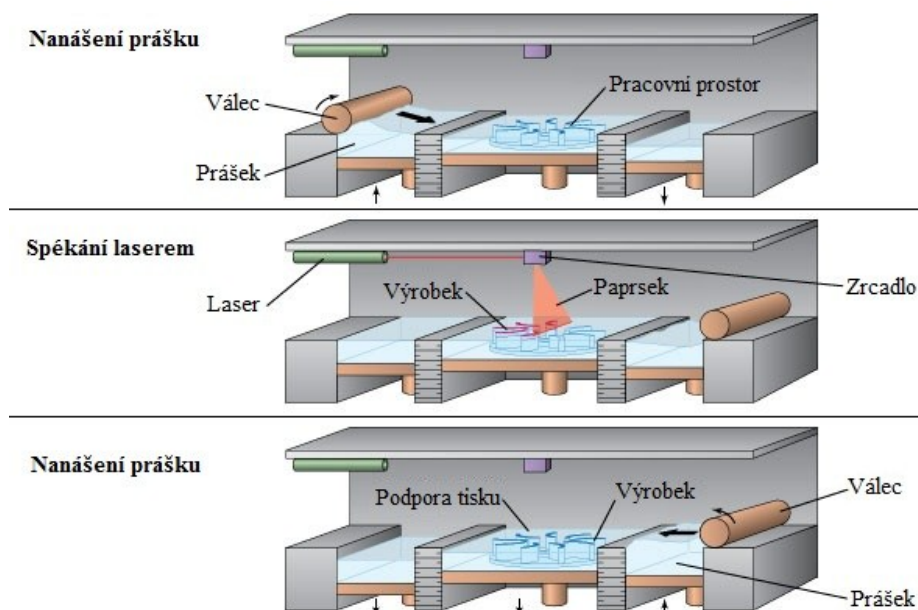


Obr. 2 tisk vytvrzením pryskyřice [2]

## 1.3 Selektivní laserové spékání (SLS, *Selective Laser Sintering*)

Tato technologie využívá vysokého výkonu laseru k fixaci malých částic prášků plastu, kovu, keramiky nebo skla do objektu, který má požadovaný trojrozměrný tvar. Laser selektivně spojuje práškový materiál pomocí 3D programu, který rozdělí celý model na vrstvy (průřezy). Po každé vrstvě, která je spečená pomocí laseru, se sníží lože s práškem o tloušťku jedné vrstvy a proces se opakuje, dokud není objekt dokončen.

Všechn nepoužitý prášek, který zůstává, funguje jako nosná podpora při tisku. Proto není potřeba žádné nosné konstrukce.[2]

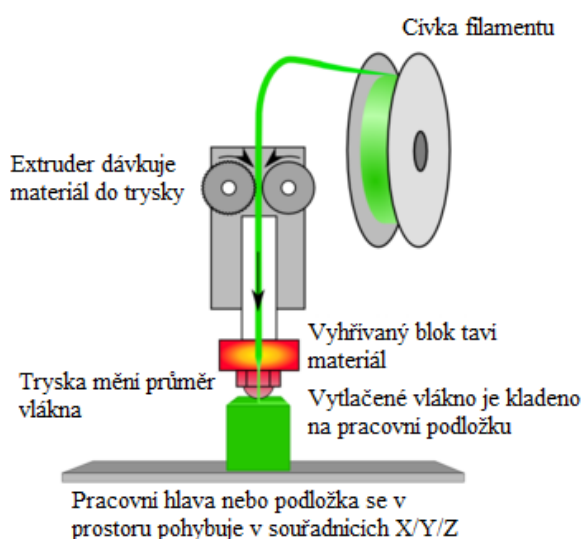


Obr. 3 postup spékání prášku laserem [3]

#### 1.4 Modelování pomocí tavené depozice (FDM, *Fused Deposition Modeling*)

FDM technologie funguje pomocí plastového vlákna, které se odvíjí od cívky pomocí dávkovače materiálu a je vytlačován tryskou. Tryska se zahřívá, taví materiál a pohybuje se v horizontálním i vertikálním směru pomocí CNC řízení. Objekt se tvoří vytlačováním roztaveného materiálu kladením vrstev na sebe. Materiál ztverdne ihned po vytlačení z trysky.

Termín modelování pomocí tavené depozice a její zkratka FDM jsou ochrannou známkou Stratasys Inc. Jiný odpovídající termín, tavené vlákno pro výrobu (FFF), byl vytvořen členy komunity RepRap. Použití tohoto výrazu je právně neomezené. [2]



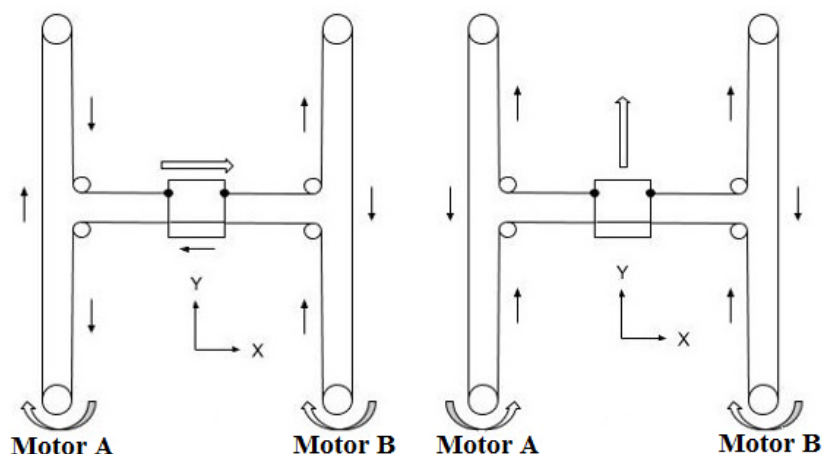
Obr. 4 modelování pomocí tavené depozice [4]

## 2. Konstrukční řešení kinematických struktur

### 2.1 Kartézská

Kartézské tiskárny jsou pojmenované po trojrozměrném souřadnicovém systému X, Y, Z, který se používá k určení pohybu efektoru tiskárny v prostoru. Obvykle osy X a Y slouží k pohybu ve vodorovném směru a nesou trysku, osa Z se pohybuje ve směru vertikálním. Půdorys tiskového prostoru má pravoúhlý tvar. Každá osa je na sobě nezávisle řízena motorem.

Zvláštním uspořádáním kartézské tiskárny je typ H-bot (XY-Core). Tento systém využívá přenosu sil pomocí dvou motorů spojených jedním synchronním řemenem. Výhodou tohoto systému je, že hmotnost uváděná do pohybu v jedné ose (X nebo Y) není realizována pouze jedním motorem, ale synchronizací dvou motorů. Díky tomu je možné získání větších sil pro pohon efektoru. Pokud se oba motory otáčejí společným směrem, dochází k pohybu v ose jedné. Při otáčení v opačných směrech dochází k pohybu v ose jiné. [5] [6]

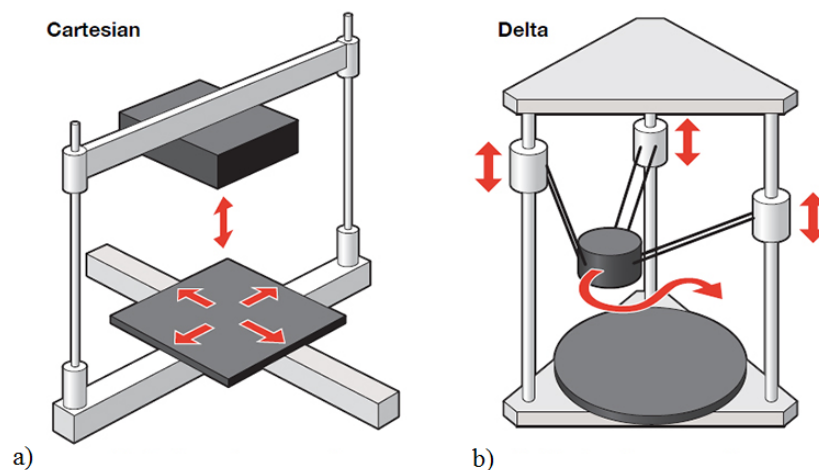


Obr. 5 schéma uspořádání typu H-bot [6]

### 2.2 S paralelní kinematikou (Delta)

Systém je tvořen třemi svislými pojezdy, ve kterých jsou uložena ramena nesoucí efektor. Ten se v rovině X a Y pohybuje v kartézském souřadnicovém systému. Každý z pojezdů je ovládán jedním motorem. Pohyb ve vodorovném směru se uskutečňuje kombinací posuvu svislých pojezdů, které jsou na sebe vázané (paralelní) pomocí ramen. Pro pohyb v ose Z se pojezdy posunou společně ve vertikálním směru. Jedná se o zjednodušenou koncepci delta-robotu. Pracovní prostor je tvořen kruhovým půdorysem a nehybnou pracovní podložkou.

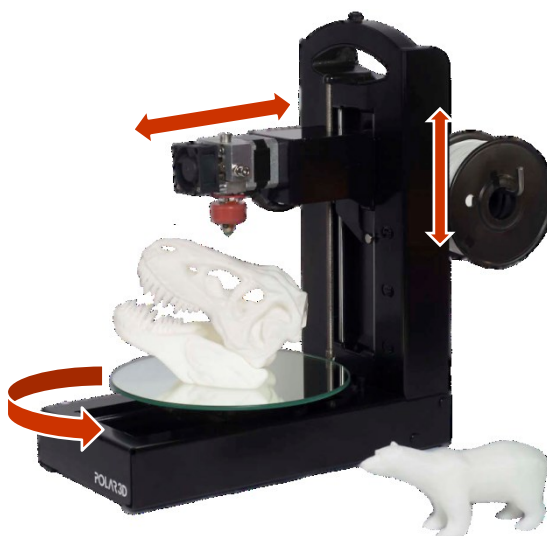
Výhodou je řízení efektoru pomocí třech motorů současně. Díky tomu je možné dosáhnout větších rychlostí, zrychlení a přenosu větších sil oproti kartézskému typu. Motory jsou upevněny k rámu a pohyblivé části mohou být tak velmi lehké. Mají lepší využití zástavbového půdorysu než tiskárny kartézské zato mají větší výšku. [5] [7]



Obr. 6 a) kartézské uspořádání, b) typ s paralelní kinematikou [8]

### 2.3 Polární

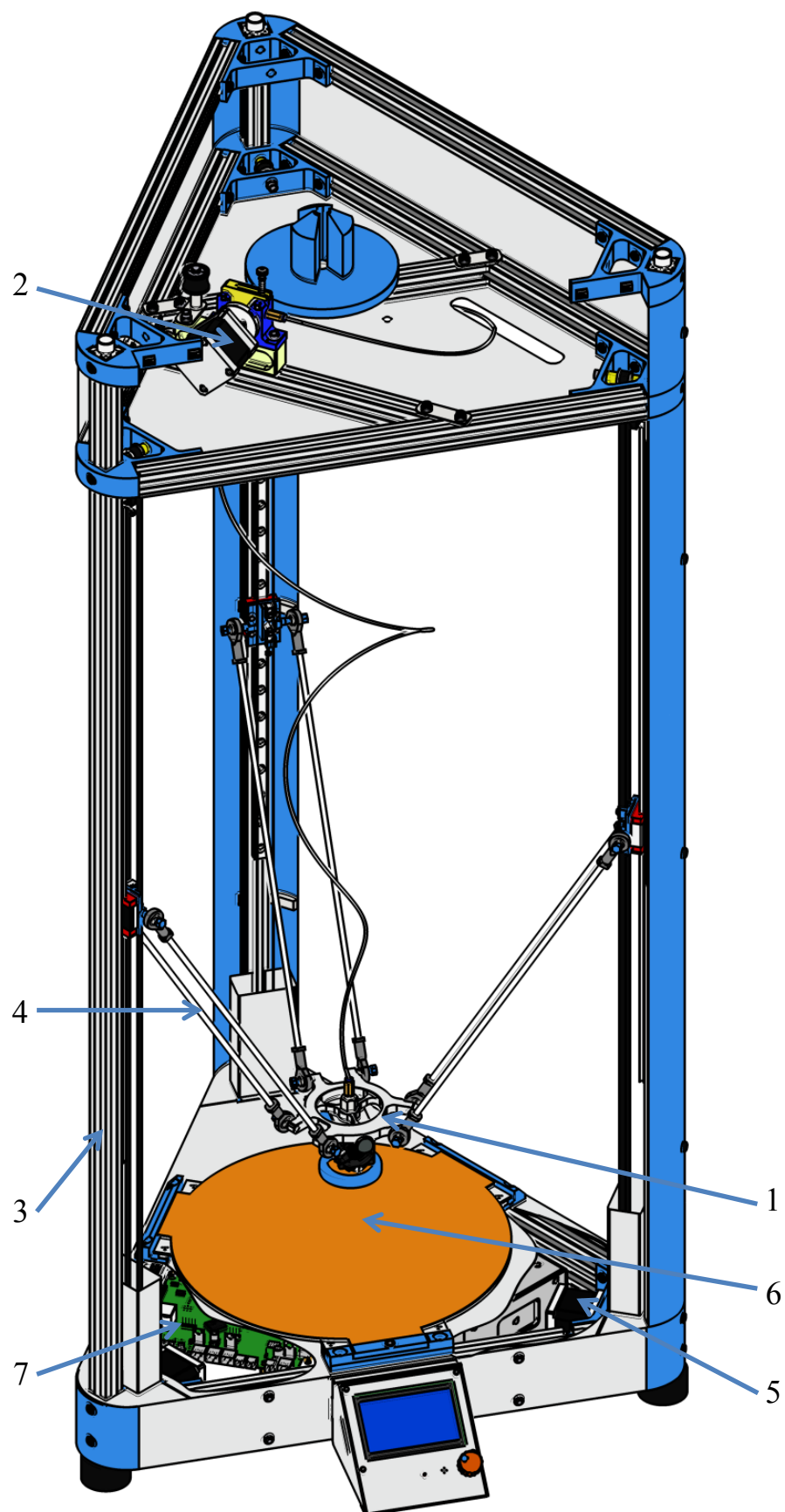
Pro pohyb v prostoru se využívá polárního souřadnicového systému. Poloha tiskové hlavy je určena natočením kruhové pracovní desky a pohybem od její osy. Natáčení je vždy uskutečněno pracovní deskou, pohyb od osy tiskovou hlavou nebo také deskou. Svislý pohyb vykonává především tisková hlava. Tento typ tiskárny je vhodný hlavně pro kruhové součásti. [5]



Obr. 7 tiskárna s polární kinematikou *POLAR3D* [9]



### 3. Jednotlivé uzly navržené tiskárny



Obr. 8 3D tiskárna v rozloženém pohledu

1 - efektor, 2 - extruder, 3 - rám, 4 - rameno, 5 - pohon, 6 - pracovní stůl, 7 - elektronika

## 4. Návrh efektoru

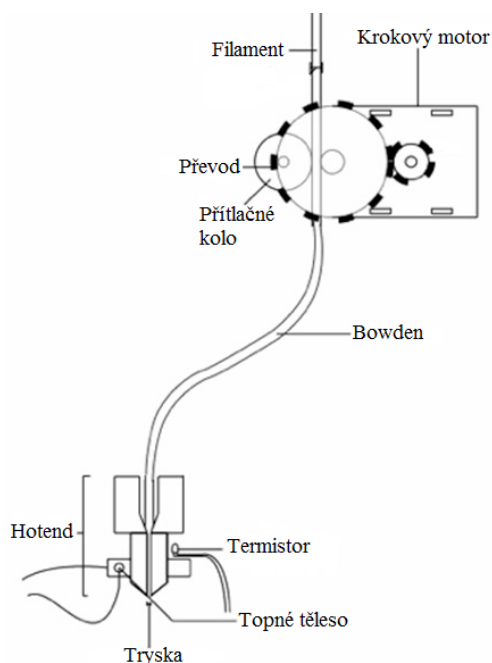
Efektor je pracovní část stroje. V případě stroje s paralelní kinematikou, je veden soustavou ramen, která řídí jeho pohyb v prostoru. Důležitým požadavkem je možnost výměny pracovního orgánu, tomto případě hlavy pro 3D tisk a jemné gravírování desek plošných spojů. Je zapotřebí, aby jeho hmotnost nebyla zbytečně velká, ale zároveň konstrukce plnila nosnou funkci a měla potřebnou tuhost.

### 4.1 Návrh hlavy pro 3D tisk

Konstrukce hlavy pro 3D tisk metodou FDM (Modelování pomocí tavené depozice) je tvořena v základu ze dvou částí a to z trysky a extruderu. Kde extruder plní funkci pohonu. Dodává a dávkuje materiál podle potřeby v podobě plastového drátu (filamentu) do trysky. Ta plast nataví na požadovanou teplotu a nanáší po vrstvách na pracovní podložku.

Jsou možné dvě konstrukční provedení tohoto uskupení. Prvním je přímý náhon, kdy extruder je upevněn společně s tryskou na efektoru.

Druhá varianta je (obr. 9), kdy tryska je upevněna k efektoru a extruder k rámu. Filament je pak veden bowdenem. Výhodou tohoto řešení je výrazně nižší hmotnost pracovní hlavy, je ale nutné, aby extruder překonal odpor, který klade filament při průchodu bowdenem. Další nevýhodou je nemožnost použití flexibilních materiálů.



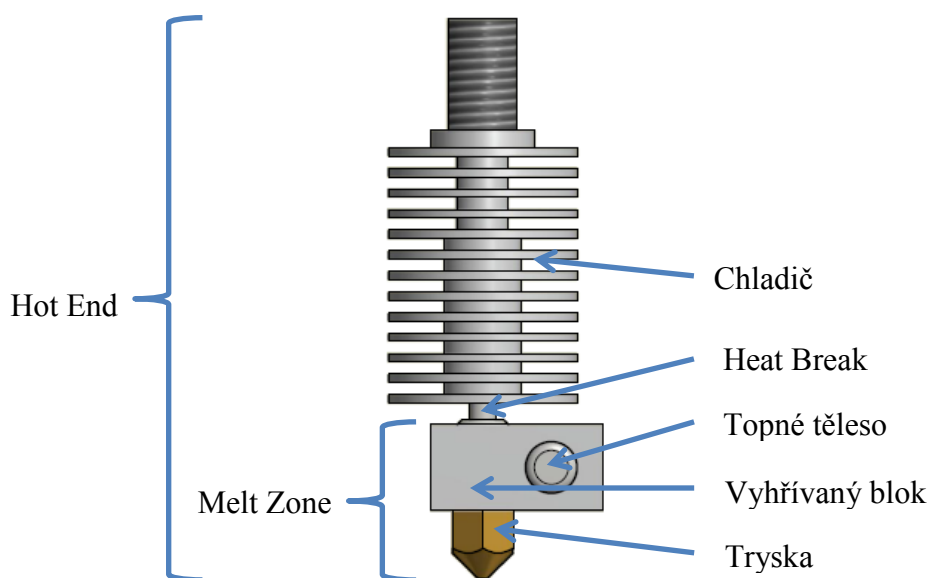
Obr. 9 schéma varianty s bowdenem [10]

Tato varianta se převážně využívá u tiskáren s paralelní kinematikou, ale také ji najdeme u tiskáren kartézských.

#### 4.1.1 Návrh sestavy trysky

Tryska je důležitou součástí, která se přímo podílí na kvalitě tisku. Musí mít dobrou tepelnou vodivost, pro zajištění prohřívání komory a následné tavení filamentu. Nejčastěji se pro její výrobu používá mosaz, dále také ocel a hliník.

Výslednou tloušťku vytlačeného vlákna určuje průměr trysky. Běžně používané výstupní průměry trysek se pohybují v rozmezí od 0,2 mm až 0,6 mm. Vláknem materiálu vstupující do trysky se vyrábí standardně v o průměru 1,75 mm a 3 mm.



Obr. 10 sestava trysky

Celá sestava má být koncipována tak, aby vyhřívaná část trysky (melt zone) nepropouštěla teplo do jiných než požadovaných oblastí. Roztavený materiál totiž ulpívá na stěnách uvnitř a klade odpor proti pohybu, proto je zapotřebí navrhnout melt zone tak velkou, aby dokázala dostatečně natavit materiál a zároveň nekladla příliš velký odpor.

Vyhřívaný blok je osazen tryskou, topným tělesem a termistorem pro kontrolu a řízení teploty. Vyrábí se z hliníku. Do něj je zasazen heat break.

Heat break je v podstatě tepelný most mezi vyhřívanou částí a chladičem. Vyrábí se z materiálu s co možná nejnížší tepelnou vodivostí, převážně z oceli. Je opatřen drážkou, aby jeho průřez byl co nejmenší a propouštěl co nejméně tepla do chladiče.

Chladič se vyrábí z hliníku, je ochlazován ventilátorem a zakončen závitem pro snadnou montáž.

#### 4.1.2 MKP analýza trysky

MKP analýza prostupu tepla byla realizována pomocí programu AUTODESK Simulation Multiphysics 2013.

Jako počáteční podmínky simulace byla použita, naměřená data z měření viz kapitola 8. Jako prvek sítě byl použit hexahedron (šestistěn). Délka simulace je 3600 s a je rozdělena na 120 kroků.

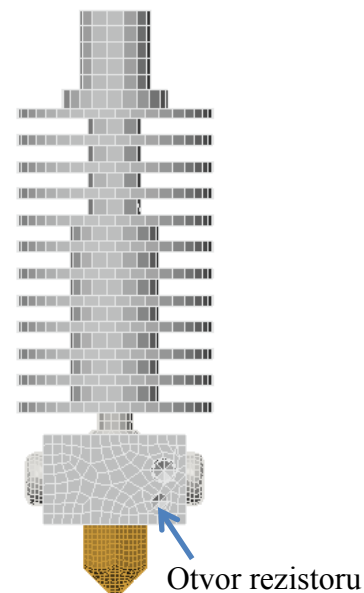
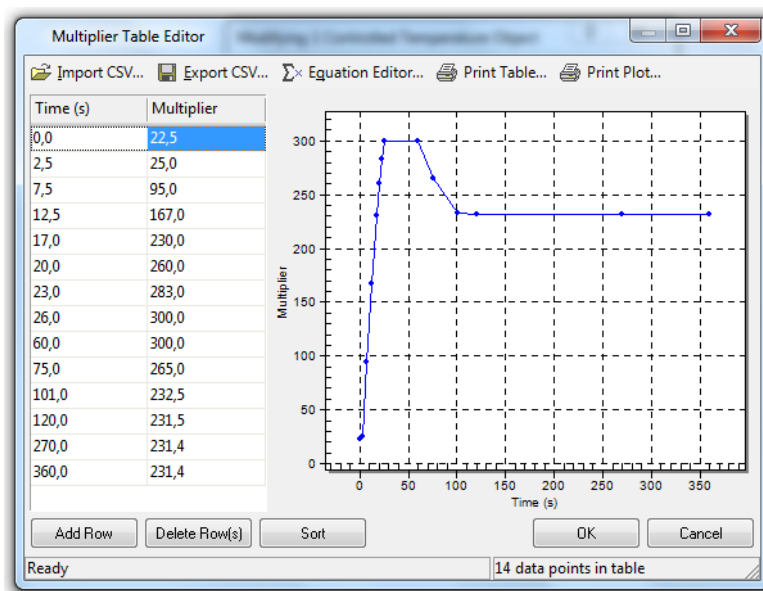
V nastavení simulace je důležité zohlednit vzájemný kontakt mezi jednotlivými součástmi. Tento parametr se nazývá rezistivita a určuje kolik daný spoj součástí propustí tepla za jednotku času. Měření tohoto parametru by bylo komplikované, proto je jednodušší porovnat data získané z měření a simulace. Následně upravit simulaci tak, aby ohřevová křivka vyhřívaného bloku měla stejný sklon a průběh jako naměřená.

Pokud by rezistivita byla zanedbána, sklon křivky by byl příliš strmý a naopak při velké rezistivitě pozvolný a ohřev by trval déle. Dále by díky většímu přenosu tepla ze součásti na součást byl více ohříván chladič a musel by být zbytečně předimenzován.

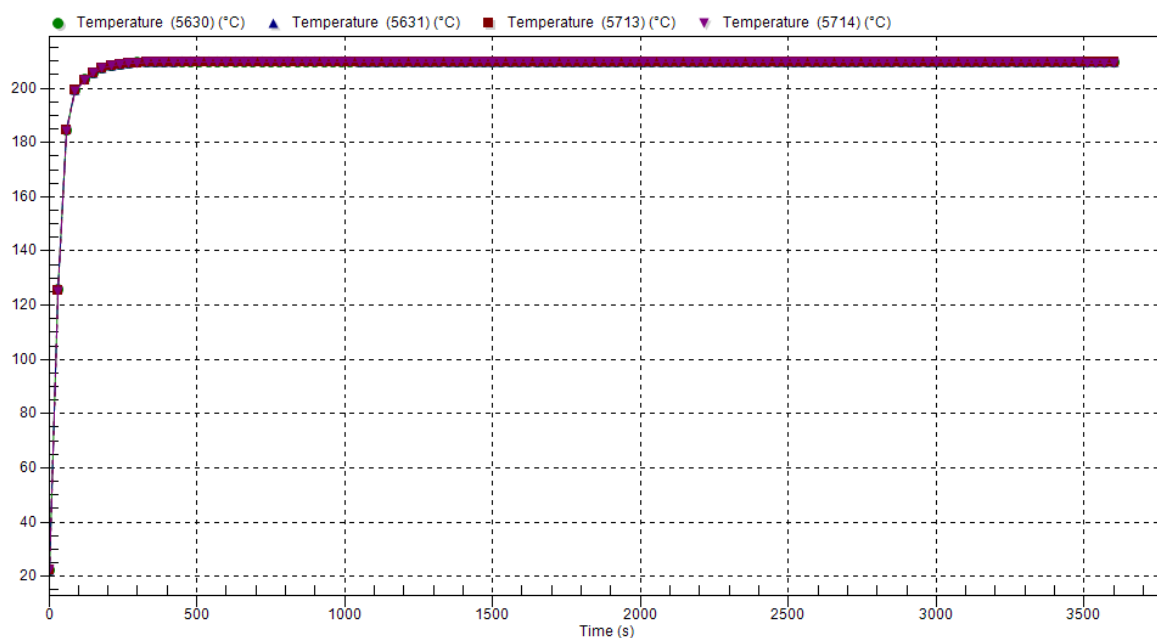
Teplota a její průběh byl měřen na prvcích sítě uvnitř otvoru pro rezistor. Tyto hodnoty byly zavedeny do grafu. Následně byla porovnávána naměřená křivka ohřevu vyhřívaného bloku s grafem simulace, dokud jejich parametry sobě neodpovídaly. Je podstatné si uvědomit, že prostup tepla od topného tělesa k rezistoru je s určitým zpožděním. Poté co rezistor zaznamená požadovanou teplotu, vypne vytápění a znova ji zapne, až klesne pod nastavenou mez a tak udržuje požadovanou hodnotu. Mezi tím se naakumuluje teplo do vyhřívaného bloku a topné těleso nemusí topit na takovou teplotu jako na počátku. Vytápění je tudíž z počátku skokové a později klesá na ustálenou mez.

Poté byla křivka upravena, aby výsledná teplota dat z grafu odpovídala měřeným hodnotám.

Cílem tohoto porovnávání simulace s měřením je zjištění rezistivity spojů mezi jednotlivými součástmi. Kde výsledná celková rezistivita je  $6 \text{ s.K.J}^{-1}$ .



Obr. 11 nastavená ohřevová křivka a ukázka vykreslené sítě hot endu s popisem



Obr. 12 výsledný graf simulace

Dále bylo v simulaci nastaveno nucené chlazení chladiče vzduchem. K tomu byl použit stejnosměrný ventilátor firmy GDSTime. Parametry ventilátoru jsou uvedeny v tab. 1 a vlastnosti vzduchu o teplotě 20°C v tab. 2.

Tab. 1 parametry ventilátoru 30x30x10 [11]

<b>Rozměry</b>	[mm]	30 x 30 x 10
<b>Připojení</b>	[-]	HP2.0-2P
<b>Pracovní napětí</b>	[V]	DC 24
<b>Pracovní proud</b>	[A]	0,08
<b>Otáčky</b>	[min <sup>-1</sup> ]	12 000
<b>Průtok</b>	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	2,21·10 <sup>-3</sup>
<b>Hlučnost</b>	[dBA]	28
<b>Uložení</b>	[-]	kluzné
<b>Životnost</b>	[hodin]	35 000
<b>Délka připojení</b>	[cm]	14
<b>Hmotnost</b>	[g]	8

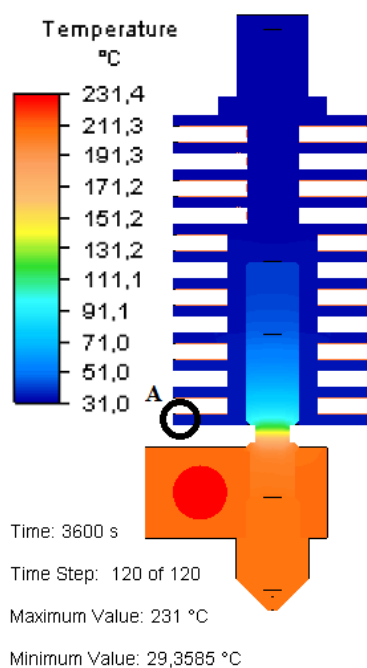
Tab. 2 vlastnosti vzduchu o teplotě 20°C [12]

<b>Hustota</b>	<b>Tepelná vodivost</b>	<b>Dynamická viskozita</b>	<b>Prantlovo číslo</b>
[kg·m <sup>-3</sup> ]	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	[Pa·s]	[-]
1,2047	0,0257	1,83·10 <sup>-5</sup>	0,713

Vnitřní průměr ventilátoru je 28,5 mm. Z toho se dá jednoduše odvodit rychlost proudění vzduchu kde:

$$v_p = \frac{Q}{S} = \frac{2,21 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot 0,0285^2}{4}} = 3,291 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.1)$$

Následně na plochách chladiče bylo nastaveno sdílení tepla konvekcí a nastaveny vstupní podmínky podle uvedených hodnot z tab. 2.

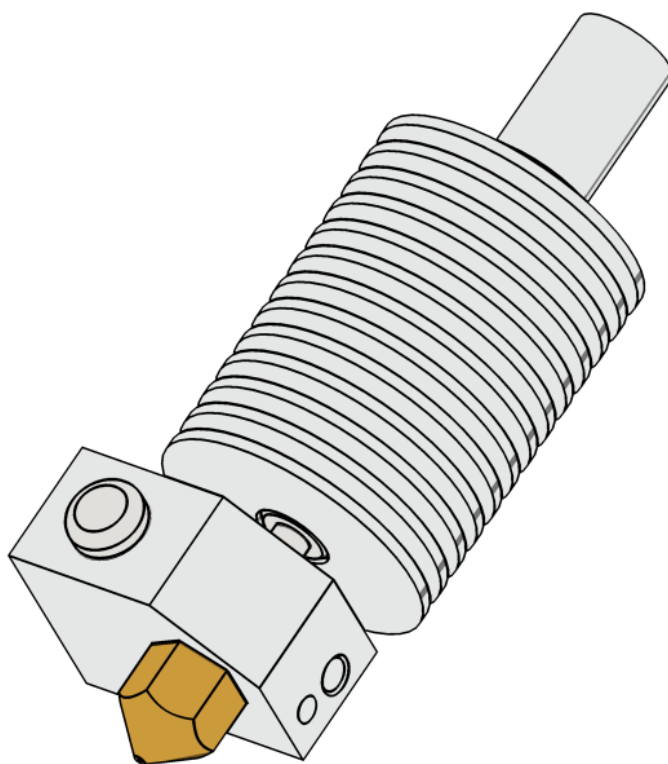


Obr. 13 ukázka rozložení tepla v čase 3600s

Na obr. 13 je zvýrazněna oblast *A*. Je to čelo chladiče, které dosahuje teploty 39,9°C. Naměřená hodnota je 42,8°C. Odchylka 2,9°C je přípustná, může však být způsobena chybou měření a také navozením ideálních podmínek v simulaci MKP.

Následně byly provedeny úpravy stávající trysky. Mezi ně patří, odlehčení vyhřívaného bloku, zmenšení průřezu heat breaku a zvětšení plochy chladiče. Tak byla navržena tryska pro materiály s většími požadavky na teplotu tisku.

Nastavení simulace z předešlé analýzy bylo přeneseno na upravenou trysku, jelikož konstrukčně nebyla změněna. Byla pouze změněna ohřevová křivka, na maximální požadovanou teplotu.



Obr. 14 ukázka upravené trysky

Jako výchozí materiál tisku byl zvolen XT-CF20 od firmy ColorFabb. Tento materiál je založen na bázi CO-POLYESTERU s 20% podílem uhlíkových vláken. Potřebné hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 specifikace materiálu XT-CF20 [12], [13]

<b>Průměr filamentu</b>	[mm]	1,75
<b>Hustota</b>	[g.cm]	1,37
<b>Měrná tepelná kapacita</b>	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	2,05
<b>Součinitel tepelné vodivosti</b>	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0,21
<b>Dynamická viskozita</b>	[Pa.s]	8000
<b>Doporučená teplota trysky</b>	[°C]	240°C - 260
<b>Doporučená teplota podložky</b>	[°C]	50°C - 70

Největší průměr trysky mějme 0,6mm, maximální rychlost tisku 300 mm.s<sup>-1</sup>. Nejvyšší teplotu trysky nastavíme jako 280°C aby byla vyloučená chyba měření termistorem a také vytvořena určitá rezerva. Počáteční teplota materiálu bude 22°C.

Nejprve byla určena hmotnost 300 mm filamentu. Následně potřebné množství tepla, které musí tryska předat materiálu.

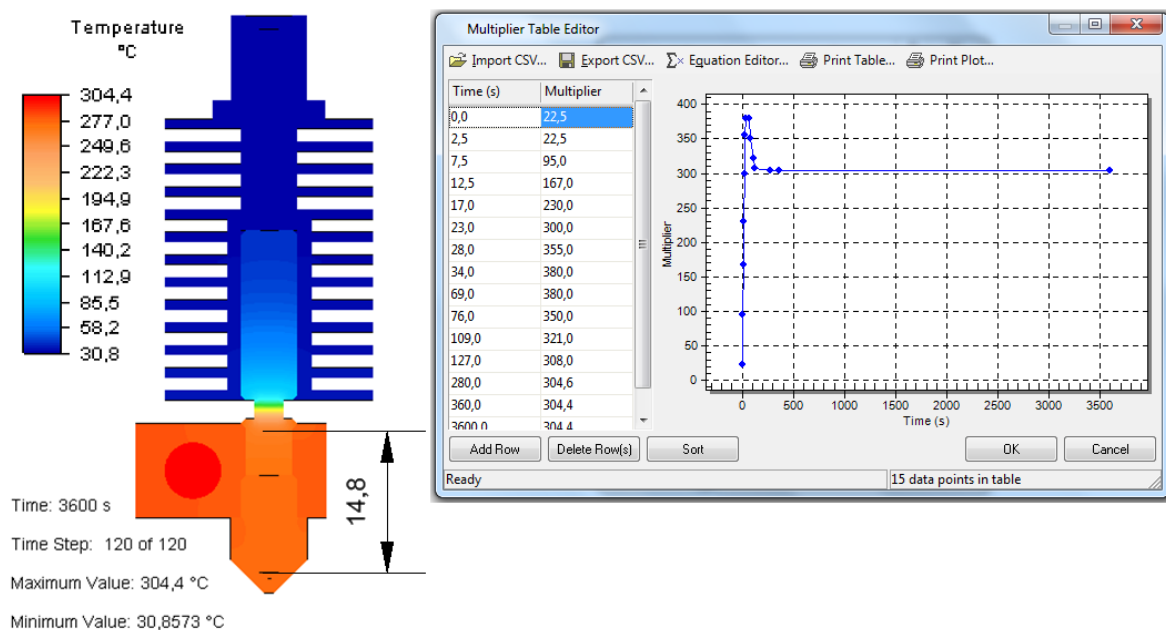
$$m_f = \rho_f \cdot V_f = \rho_f \cdot \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} \cdot h_f \quad (4.2)$$

$$m_f = 1370 \cdot \frac{\pi \cdot (1,75 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 0,3 = 9,88 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

$$Q_o = m_f \cdot c \cdot \Delta T = 9,88 \cdot 10^{-4} \cdot 2,05 \cdot (280 - 22) = 522,8 \text{ J} \quad (4.3)$$

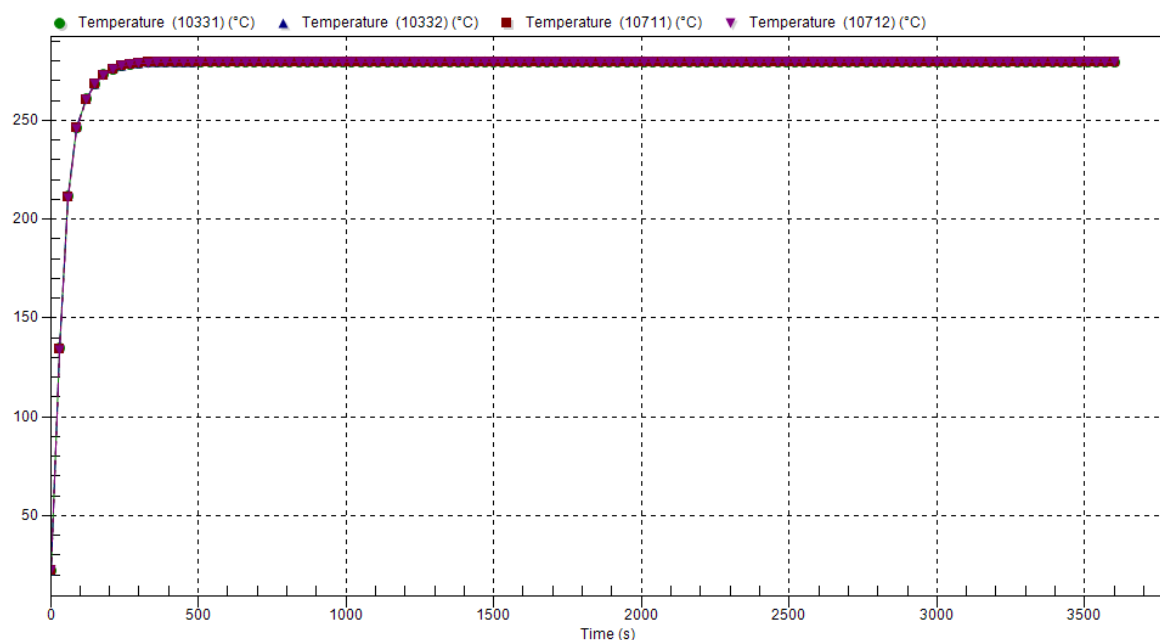
Po dokončení simulace byla naměřena melt zone v délce 14,9 mm a v rozsahu teplot 276,4°C až 262,36°C od vnitřního osazení trysky s průměrem 1,75 mm po uzel sítě s nejnižší přípustnou teplotou daný materiál. Do této oblasti bylo zavedeno sdílení tepla konvekcí a nastaveny vstupní podmínky podle tab. 2. Poté znova provedena simulace.





Obr. 15 rozložení teplot upravené trysky se zaznačenou melt zone a ohřevová křivka topného tělesa

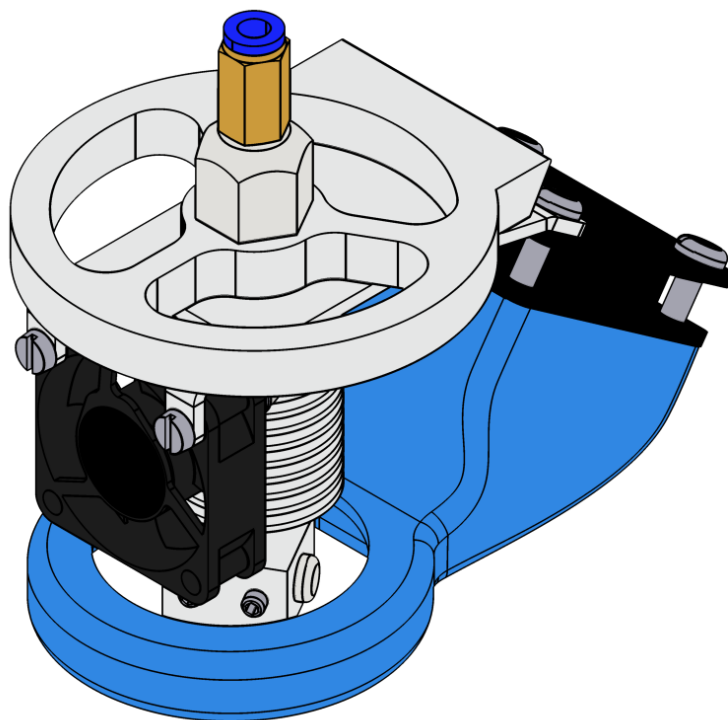
Melt zone má být koncipována tak, aby dokázala materiál jí procházející natavit na požadovanou teplotu a zároveň se udržet na stálé teplotě. Její výška se může měnit v závislosti na rychlosti zasouvání materiálu. Nicméně nesmí přesáhnout zúženou část heat breaku a zasahovat tak do chladiče. Tuto podmínku splňuje tato tryska i v klidovém stavu.



Obr. 16 graf ohřevu navržené trysky

Přesné hodnoty grafu a údaje MKP analýzy jsou uvedeny v elektronické příloze z důvodu lepší čitelnosti.

Navržená tryska byla opatřena upínací deskou s chlazením trysky, dále pomocným chlazením výtisků s difuzorem a pneumatickou spojkou pro připojení na bowden extruderu.



Obr. 17 sestava hlavy pro tisk

#### 4.1.3 Návrh extruderu

Extruder dodává a dávkuje materiál do trysky. Bowdenový extruder se skládá z krokového motoru a případně i převodu pro jemnější dávkování. Ten je osazen ozubeným podávacím kolečkem, ke kterému je pomocí kladky s pružinou přitlačován filament. Nastavení přitlaku se reguluje šroubem. Motor s převodovkou je upevněn v držáku a ten k rámu. Spojení bowdenu a držáku je realizováno nástrčnou pneumatickou spojkou.

Z naměřených hodnot v tab. 10 je největší odpor materiálu v trysce  $R_T$  pro materiál ABS a to 8,5 N. Při poloměru podávacího kolečka  $r_p$  10,8 mm je možno určit minimální potřebný moment  $M_p$ .

$$M_p = R_T \cdot r_p = 8,5 \cdot 0,0108 = 0,0922 \text{ Nm} \quad (4.4)$$

Na tomto základě byl navržen motor s planetovou převodovkou 17HS15-1684S-PG5:1. Planetová převodovka byla zvolena z důvodu jemnějšího dávkování a možnosti detailnějšího tisku. Přesné parametry motoru jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 specifikace krokového motoru s převodovkou [14]

<b>Typ motoru</b>	[-]	Bipolární
<b>Délka kroku</b>	[°]	1.8
<b>Statický moment</b>	[Nm]	1.68
<b>Jmenovitý proud</b>	[A]	1.68
<b>Odpor</b>	[Ω]	1.65
<b>Doporučené napětí</b>	[V]	12 - 24
<b>Indukčnost</b>	[mH]	3.2
<b>Typ převodu</b>	[-]	Planetový
<b>Převodový poměr</b>	[-]	5,18:1
<b>Účinnost</b>	[%]	90
<b>Maximální dovolený moment</b>	[Nm]	2
<b>Maximální axiální zatížení hřídele</b>	[N]	50
<b>Maximální radiální zatížení hřídele</b>	[N]	100

Při rychlosti tisku 300 mm.s<sup>-1</sup> budou otáčky motoru extruderu  $n_E$ :

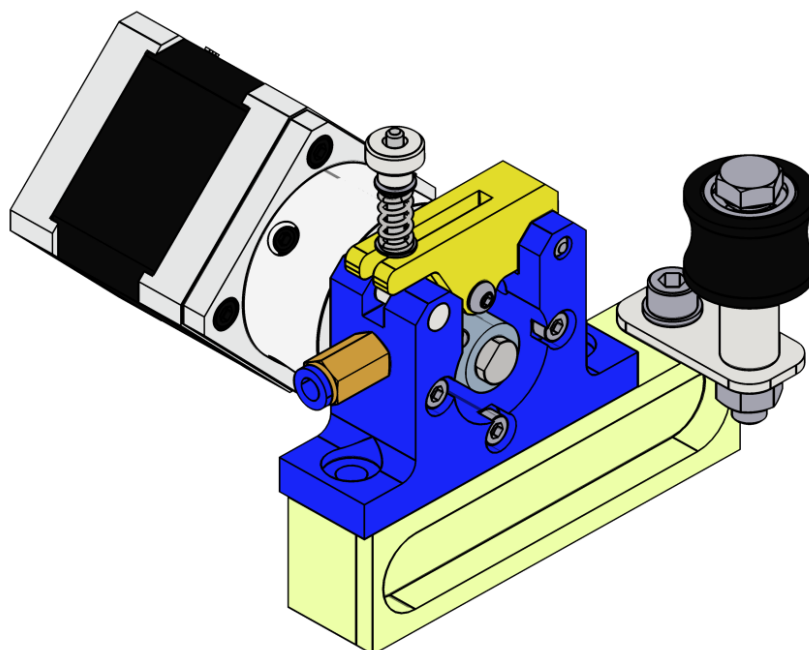
$$n_E = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r_p} = \frac{0,3}{2 \cdot \pi \cdot 0,0108} = 4,4 \text{ s}^{-1}$$

Z toho otáčky na motoru převodovky  $n_{ME}$ :

$$n_{ME} = n_E \cdot i = 4,4 \cdot 5,18 = 22,9 \text{ s}^{-1} \quad (4.5)$$

Celkový počet otáček motoru převodovky při maximální rychlosti tisku je 22,9 s<sup>-1</sup>. Aby nedošlo k porušení materiálu, byla sestava extruderu opatřena pomocnou vodící kladkou pro vedení filamentu z cívky k podávacímu kolečku.

Pro připojení extruderu a tiskové hlavy k bowdenu je použita nástrčná pneumtická spojka KQ2H04-M5A. Jako bowden je použita teflonová trubička o průřezu 4x2 mm a délce 1430 mm.



Obr. 18 sestava extruderu s vodící kladkou

## 4.2 Návrh hlavy pro gravírování

Gravírovací hlava má být navržena pro jemné obrábění desek plošných spojů. Také musí umožňovat jak výměnu nástroje, tak i celé hlavy a záměny za hlavu pro 3D tisk.

### 4.2.1 Deska plošných spojů

Plošný spoj, také deska plošných spojů, zkráceně DPS nebo v angličtině printed circuit board, zkráceně PCB nebo rigid PCB, se v elektronice používá pro upevnění a zároveň vodivé propojení elektronických součástek. Ty jsou mezi sebou propojeny měděnými vodivými vrstvami, které jsou vyrobeny leptáním. Součástky jsou k desce připájeny cínovou pájkou. Buď prostrčením vývodů otvory desky a následně na druhé straně připájeny k měděným cestám. V poslední době je velmi rozšířena povrchová montáž (SMD), kde součástka má kontaktní plochy za které je připájena k desce na stejné straně jako je namontována. Výhodou je možná montáž na obou stranách desky.

Materiálem pro výrobu DPS se nejčastěji používá laminát (Prepreg, P.P) ze skelné tkaniny sycený epoxidovou pryskyřicí. Z jedné nebo obou stran je nanесena měděná vrstva, převážně o tloušťce 17 nebo 35 mikrometrů, výjimečně pro náročnější účely až 70 mikrometrů. Tloušťka laminátové desky se pohybuje od 0,1 mm do 2,5 mm výjimečně větší.

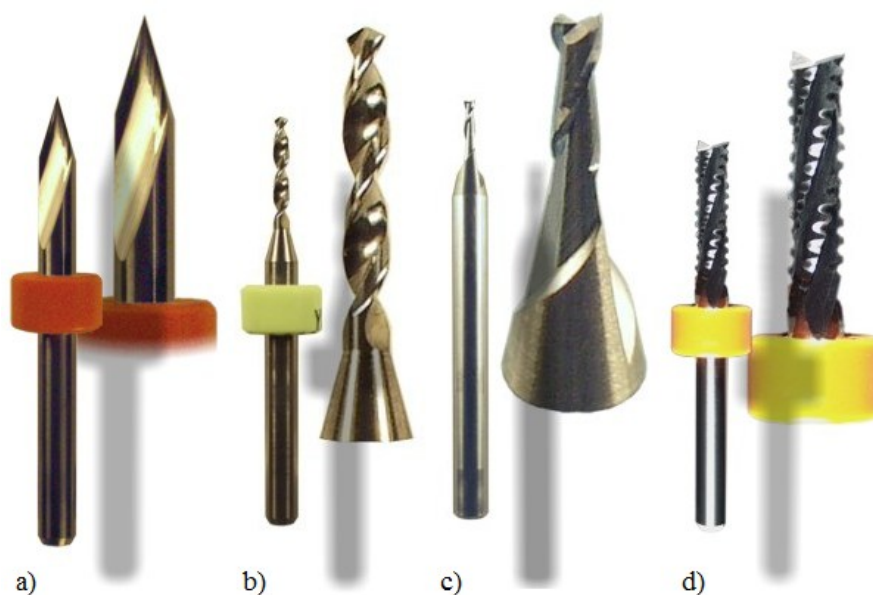
Jako základní materiál desky se u jednodušších aplikací používá i speciální papír, nebo papír v kombinaci s laminátem. Pro vysokofrekvenční obvody se používá laminát s příměsí teflonu. [15]

#### 4.2.2 Návrh vřetene

Jelikož se u frézování DPS jedná o odebrání velmi malých vrstev o velikosti desetin milimetrů, byl by celkový výpočet zbytečně pracný a časově náročný. Ve výsledku by byl zvolen motor pro vřeteno, který by dosahoval co největších otáček při kompaktních rozměrech. Z toho důvodu bude úspornější zvolit motor podle doporučených hodnot pro nástroje ke gravírování.

Důležité je brát v úvahu hloubku záběru nástroje a uvažovat i s nerovností laminátové desky. Například při frézování měděné vrstvy 0,07 mm je nutné počítat s přídavkem, a tak celková hloubka záběru nástroje může dosahovat až 0,1 mm i více. V tom případě bude obráběna i samotná laminátová deska.

Pokud vezmeme v úvahu samotný nástroj, může se jednat o hrot pro jemné detaily nebo o stopkovou frézu pro hrubé frézování či kontury. Při odebrání tak malé vrstvy je zřejmé, že i na tak malém záběru nástroje bude zapotřebí hlavně vysokých otáček a malých krouticích momentů.



Obr. 19 gravírovací nástroje a) gravírovací hrot, b) vrták, c) dvoubřitá fréza, d) čtyřbřitá fréza [16]

Výrobce těchto nástrojů udává obecně doporučené otáčky v rozmezí  $20\,000\text{ min}^{-1}$  až  $100\,000\text{ min}^{-1}$ . Pro hrot v rozmezí  $6\,000\text{ min}^{-1}$  až  $20\,000\text{ min}^{-1}$ .

Vřetena profesionálních gravírovacích strojů běžně dosahují až  $100\,000\text{ min}^{-1}$ . Vřeteno takových parametrů by bylo příliš velké a pro upevnění na efektor by bylo nepraktické. Také by zvyšovalo celkovou hmotnost hlavy. Nicméně kvalita obrobku není závislá jen na velikosti otáček, ale i na rychlosti posuvu. Proto je možné najít určitý kompromis za cenu delší doby obrábění.

Navrhovaný stejnosměrný motor 775-5520F dosahuje otáček až  $18\,416\text{ min}^{-1}$ . Používá se v malých přímých bruskách, a v kombinaci s převodovkou v ručních vrtačkách. Rotor je uložen na kuličkových ložiscích a opatřen výstupní hřídelí o průměru 5 mm. Specifikace motoru jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 parametry stejnosměrného motoru [17]

Typ	Napětí	Naprázdno		Zatížený při nejvyšší účinnosti				
	Rozsah (jmen.)	Otáčky	Proud	Otáčky	Proud	Moment	Výkon	Účinnost
	[V]	$[\text{min}^{-1}]$	[A]	$[\text{min}^{-1}]$	[A]	[g.cm]	[W]	[%]
775-5520F	12,0 - 24,0	21 000	1,70	18 416	10,72	962	181,93	71



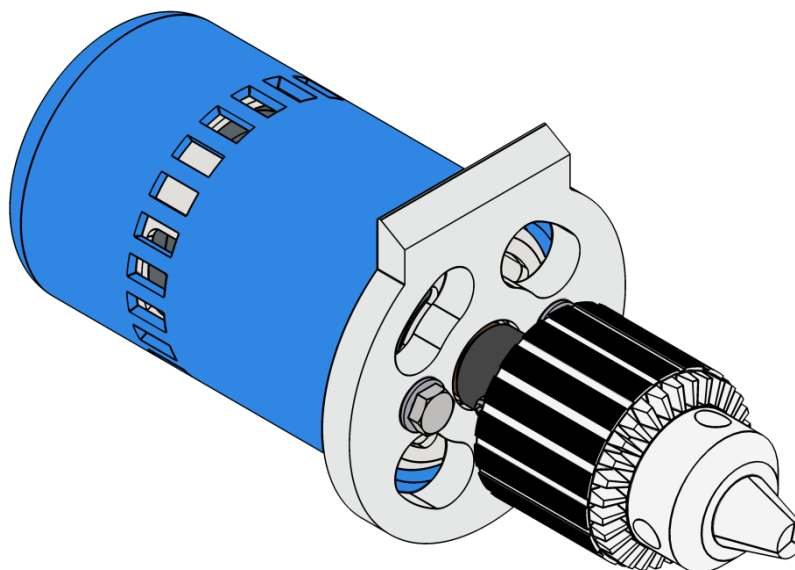
Obr. 20 stejnosměrný motor 775-5520F

Motor byl opatřen redukcí pro montáž malého vrtačkového sklíčidla  $1/4''$ , základní parametry sklíčidla jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 parametry upínacího sklíčidla [18]

Rozsah upnutí	Montážní závit	Délka otevřený / zavřený	Největší průměr	Hmotnost
[mm]	["]	[mm]	[mm]	[g]
0,7 – 6,3	3/8	40,0 – 51,3	28,7	0,136

Také byla upevněna upínací deska a tělo motoru bylo opatřeno krytem proti nečistotám, viz Obr. 21.



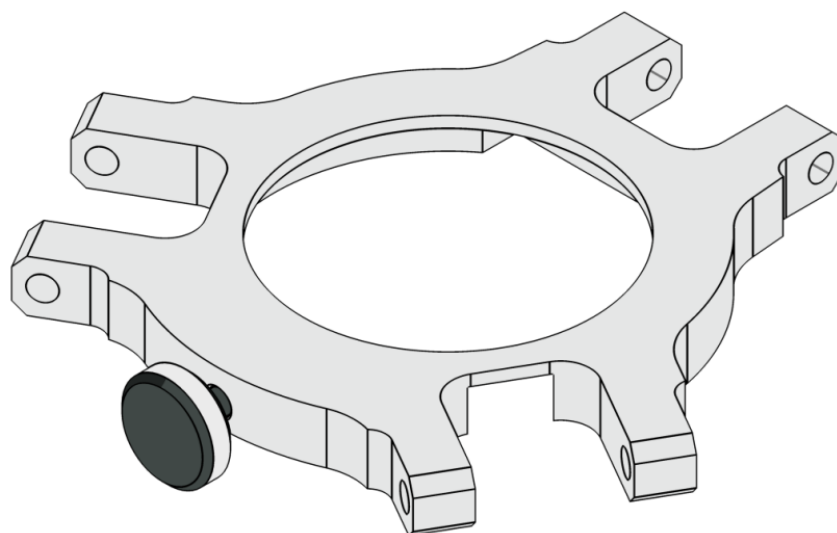
Obr. 21 sestava hlavy pro gravírování

### 4.3 Tělo efektoru

Tělo efektoru je tvořeno nosnou deskou (obr. 22) vyrobenou z hliníkové slitiny s možností výměny a upevnění pracovních hlav. Upínací mechanismus je realizován zapuštěnou kruhovou kapsou v těle efektoru. Kapsa je opatřena drážkou se zkosenou stěnou, ta při upnutí tlačí upínací desku proti lícní ploše efektoru.

Při montáži je upínací deska zasunuta zkoseným nosem nejprve do drážky a poté do kruhové kapsy. Následně aretována šroubem proti uvolnění.

Nosná deska je dále opatřena šesti otvory M5 pro montáž kulových čepů pohonných ramen.



Obr. 22 tělo efektoru



## 5. Odvození základních rovnic pro paralelní kinematiku

Následující kapitole budou obecně odvozeny základní rovnice kinematiky a dynamiky pro konstrukci s paralelní kinematikou. Tyto rovnice budou důležité pro následné určení velikosti lineárního vedení, zatížení jednotlivých komponent a určení pohonu.

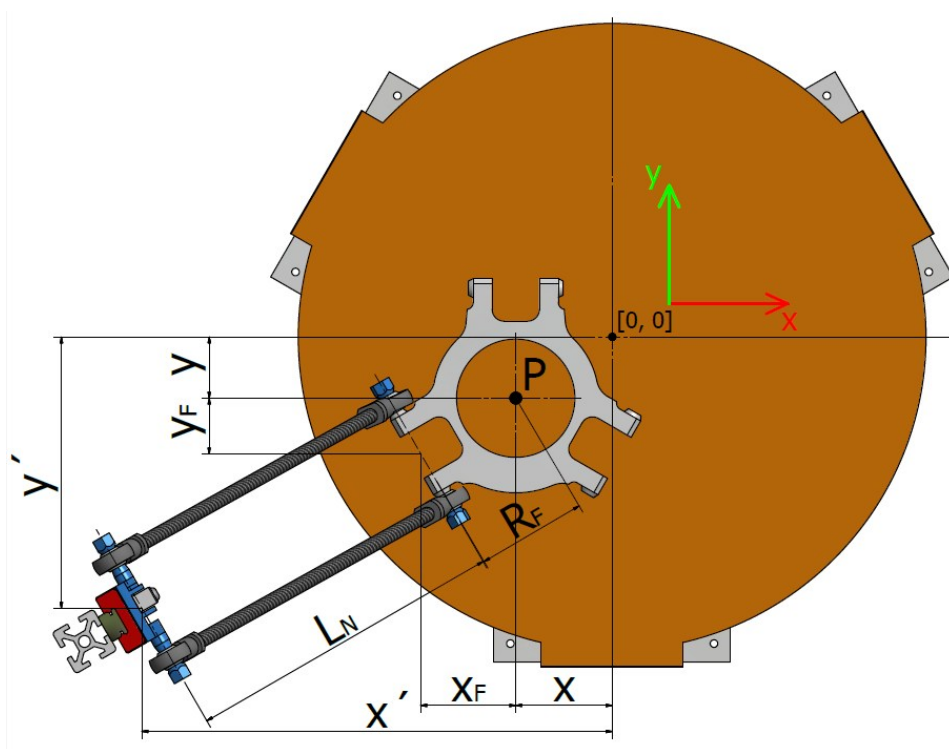
### 5.1 Odvození rovnic kinematiky

Na obr. 23 je znázorněn pracovní prostor tiskárny v půdorysu. Kde  $L_N$  je délka ramene promítnuta do půdorysu.  $R_F$  je poloměr efektoru od osy ramen,  $x'$  a  $y'$  je vzdálenost od počátku souřadného systému po osu vedení, která je pevně dána konstrukcí. Bod  $P$  je umístěn ve středu efektoru a udává polohu v rovině  $xy$ . Hodnoty  $x$  a  $y$  udávají souřadnice přesunutí bodu  $P$  v souřadném systému,  $x_F$  a  $y_F$  je vzdálenost od osy efektoru ke středu ramen.

Rovnice pro výpočet neznáme  $L_N$ :

$$(x' + x - x_F)^2 + (y' + y - y_F)^2 = L_N^2 \quad (5.1)$$

$$\sqrt{(x' + x - x_F)^2 + (y' + y - y_F)^2} = L_N \quad (5.2)$$



Obr. 23 schéma pracovního ramene v půdorysu

Na obr. 24 jde vidět nárys tiskárny kde  $L_R$  je délka ramene,  $h_p$  původní výška vozíku při souřadnicích  $[0, 0, 0]$  a je dána konstrukcí tiskárny,  $d_p$  udává dráhu vozíku změně souřadnic  $x$  a  $y$ .

V následujících rovnicích je odvozena neznámá  $d_p$ :

$$L_R^2 - L_N^2 = (h_p + d_p)^2$$

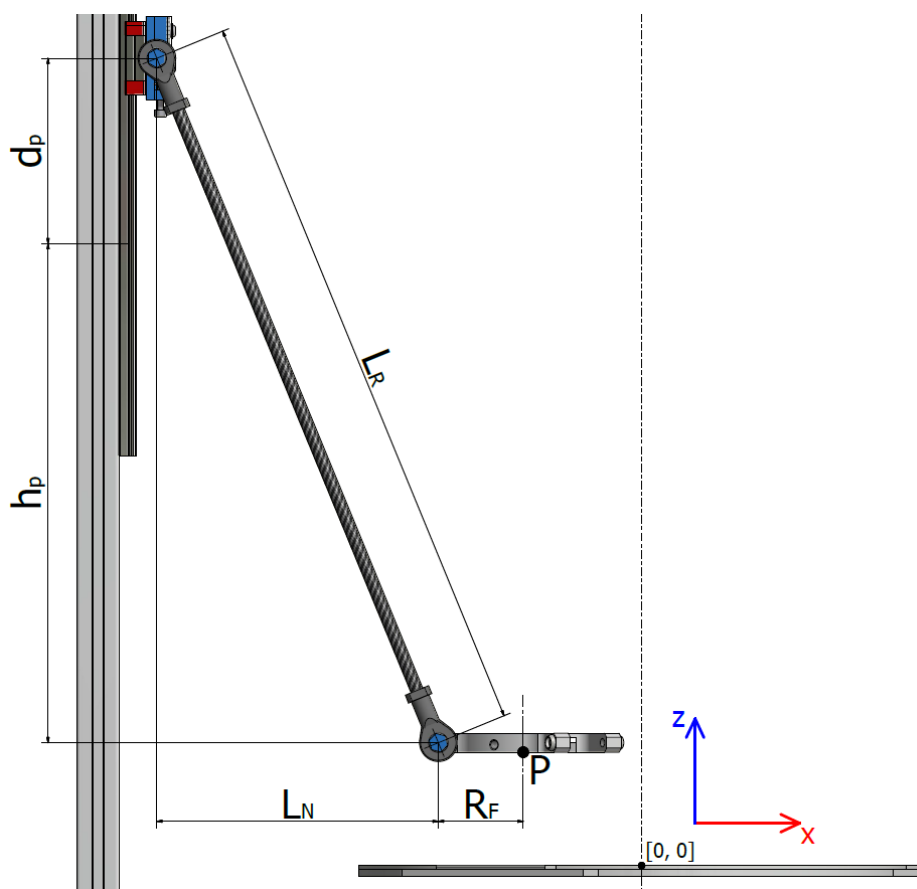
$$\sqrt{L_R^2 - (h_p + d_p)^2} = L_N$$

Dosazením do rovnic nárysny dostaneme:

$$\sqrt{L_R^2 - (h_p + d_p)^2} = \sqrt{(x' + x - x_F)^2 + (y' + y - y_F)^2}$$

Po několika úpravách získáme rovnici vyjadřující neznámou  $d_p$ :

$$d_p = \sqrt{L_R^2 - (x' + x - x_F)^2 + (y' + y - y_F)^2} - h_p \quad (5.3)$$



Obr. 24 schéma pracovního ramene v nárysu

Při posunutí efektoru ve směru osy  $z$ , se posouvají všechny tři ramena o stejnou vzdálenost ve směru pohybu.

## 5.2 Odvození rovnic dynamiky

Pokud dojde ke zrychlení efektoru  $a$  vzniká podle druhého Newtonova zákona síla:

$$F_{ae} = a \cdot m \quad (5.4)$$

Kde  $F_{ae}$  je síla vzniklá zrychlením pohybující se hmotou efektoru  $m$ . Stejně tak vzniká i tíhová síla.

$$F_{Ge} = g \cdot m \quad (5.5)$$

Berme v úvahu, že zatížení působící od efektoru se rovnoměrně rozkládá do všech šesti ramen. Pak tedy síla vyvolaná zrychlením bude působit na každé rameno velikostí:

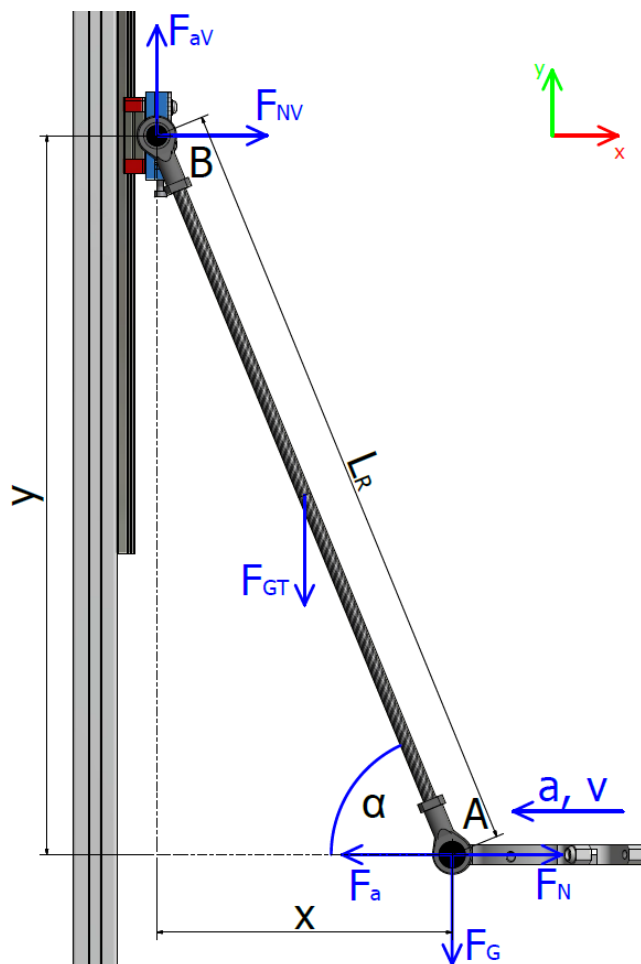
$$F_a = \frac{F_{ae}}{6} \quad (5.6)$$

Stejně tak tíhová síla  $F_G$ :

$$F_G = \frac{F_{Ge}}{6} \quad (5.7)$$

### 5.2.1 Statické hledisko

Na obr. 25 je znázorněno základní schéma působení sil na jedno rameno. Kde  $F_{GT}$  je tíha ramene s kloubovými hlavami.



Obr. 25 základní schéma

Při rozkladu sil:

$$x: \quad F_N + F_{NV} - F_a = 0 \quad (5.8)$$

$$y: \quad F_{aV} - F_{GT} - F_G = 0 \quad (5.9)$$

$$M_A: \quad F_{aV} \cdot x + F_{NV} \cdot y - F_{GT} \cdot \frac{L_R}{2} \cdot \cos \alpha = 0 \quad (5.10)$$

Po úpravách rovnic dostaneme hledané reakce:

$$F_{aV} = F_{GT} + F_G \quad (5.11)$$

$$F_{NV} = \frac{F_{GT} \cdot \frac{L_R}{2} \cdot \cos \alpha - (F_{GT} + F_G) \cdot x}{y} \quad (5.12)$$

$$F_N = F_a - F_{NV} \quad (5.13)$$

Nyní můžeme určit statický moment motoru. Kde  $r_{\check{R}}$  je poloměr pohonné kladky a  $m_V$  hmotnost celého vozíku.

Rovnice pro zvedání vozíku [18]:

$$M_{V+} = (m_V \cdot g + 2 \cdot F_{aV}) \cdot r_{\check{R}} \quad (5.14)$$

Pro spouštění vozíku [18]:

$$M_{V-} = (2 \cdot F_{aV} - m_V \cdot g) \cdot r_{\check{R}} \quad (5.15)$$

Následně odvozená rovnice pro výpočet potřebného statického momentu motoru:

$$M_{MS} = \frac{M_{V+}}{\eta_C} \quad (5.16)$$

Kde  $\eta_C$  je celková účinnost mechanismu.

### 5.2.2 Kinematické hledisko

Je podstatné k určení zrychlení a rychlosti vozíku pojezdu. Vychází z analytického řešení, které je založeno na analytické geometrii a na aplikaci základních rovnic kinematiky.

Kde rychlost boru B:

$$v_B = \frac{dy_B}{dx_A} \cdot \frac{dx_A}{dt} = \frac{-x_A}{\sqrt{L_R^2 - x_A^2}} \cdot v_A \quad (5.17)$$

Z toho je možno odvodit:

$$p(x_A) = -\frac{x_A}{\sqrt{L_R^2 - x_A^2}} \quad (5.18)$$

Ve výsledku rovnice 5.18 je velmi důležité záporné znaménko, které udává jedinečnou informaci o směru pohybu. Kladné znaménko udává směr pohybu ve směru narůstající souřadnice, záporné naopak ve směru klesající souřadnice.

Záporné znaménko ve výše uvedeném vzorci znamená, že při pohybu bodu  $A$  doprava bude bod  $B$  klesat a naopak. [19]

Dále rovnice zrychlení bodu  $B$ :

$$a_B = \frac{dy_B}{dx_A} \cdot v_A^2 + p \cdot a_A = q \cdot v_A^2 + p \cdot a_A \quad (5.19)$$

Kde:

$$q(x_A) = \frac{dp}{dx_A} \quad (5.20)$$

Z vypočteného největšího zrychlení bodu  $B$  je možné určit úhlové zrychlení motoru:

$$\varepsilon_M = \frac{a_{Bmax}}{r_{\check{R}}} \quad (5.21)$$

Kde  $r_{\check{R}}$  je poloměr hnací řemenice.

### 5.2.3 Dynamické hledisko

Je podstatné k určení dynamického momentu motoru  $M_{MD}$ . Kde  $J_{\check{R}}$  je moment setrvačnosti hnací řemenice a  $J_K$  moment setrvačnosti kladky.

$$M_{MD} = J_C \cdot \varepsilon_M + M_{V+} \quad (5.22)$$

Kde  $J_C$ :

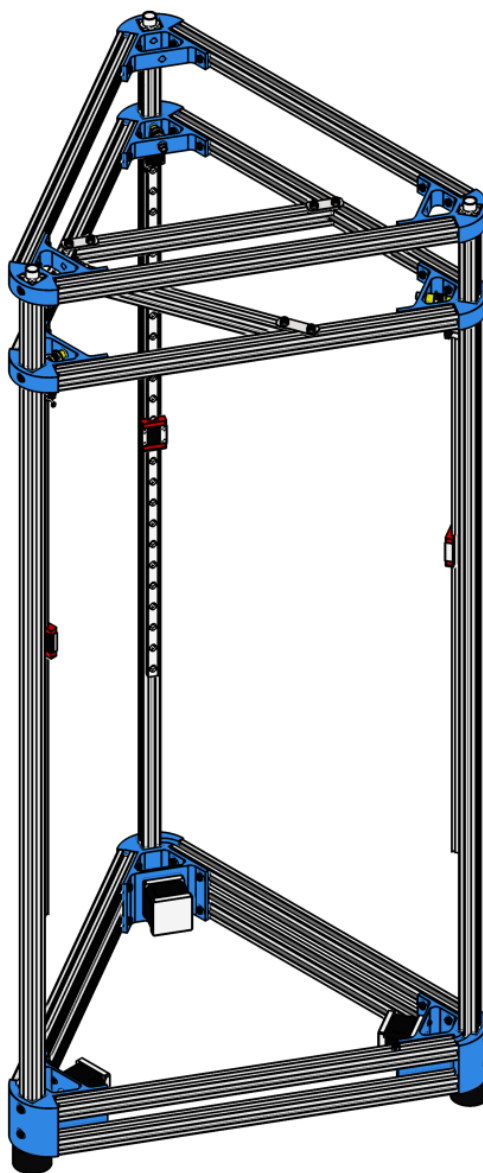
$$J_C = J_{\check{R}} + J_K \quad (5.23)$$

## 6. Návrh rámové konstrukce a hlavních uzlů

### 6.1 Návrh rámu

Rám je trojúhelníkového půdorysu uzavřená konstrukce, tvořená hliníkovými profily 20x20 mm, které jsou navzájem spojeny rohovými spojkami. Ty umožňují montáž krokových motorů a kladek pro pohon efektoru. Jednotlivé součásti jsou na rám upevněny pomocí matic M5 uložených v rybinových drážkách profilu.

Dolní část rámu je opatřena gumovými nohama pro zajištění stability a tlumení vibrací. Také prostorem pro uložení řídicí elektroniky a upevněním pracovního stolu. Horní část má prostor pro uložení cívky s materiálem pro tisk a extruderem.

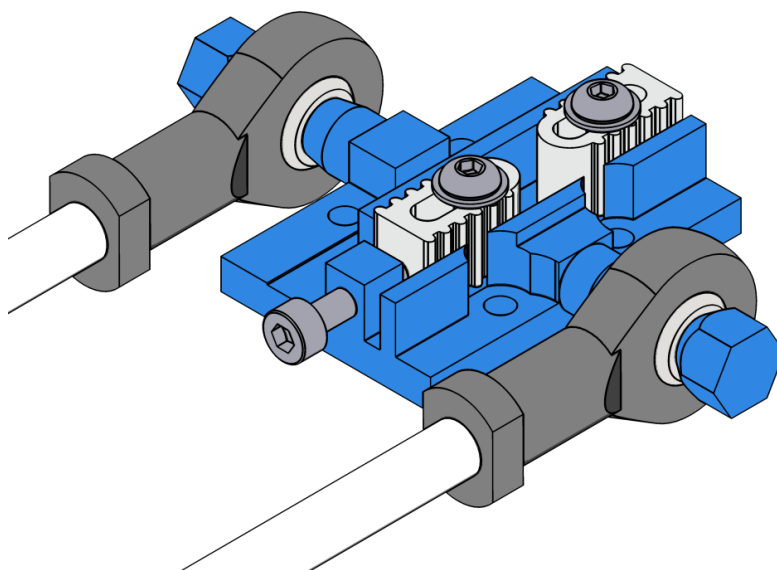


Obr. 26 rám tiskárny

## 6.2 Návrh hnacích ramen a lineárního vedení

Ramena jsou vyrobena z karbon uhlíkových trubek o průřezu 6x4x mm a délce 300 mm. Zakončeny jsou kloubovými hlavami firmy Igubal KBRM-05-M4. Pomocí kloubových hlav jsou upevněny jak k efektoru, tak k vozíku ramene. Jelikož zatížení těchto komponent je velmi malé, jejich pevnost nebyla dále řešena.

Vozík je opatřen aretací synchronního řemene, který zároveň plní funkci napínáku.



Obr. 27 detail vozíku ramene s kloubovými hlavami a napínákem

Nyní je možné určit minimální potřebnou délku vedení vozíku pomocí odvozených rovnic kinematiky. Kde nejvzdálenější souřadnice od vozíku ramene na obr. 23, 24 a hlavní parametry jsou:

$$x = 114,748 \text{ mm}$$

$$y = 66,25 \text{ mm}$$

$$x' = 198,506 \text{ mm}$$

$$y' = 114,608 \text{ mm}$$

$$x_F = 40,27 \text{ mm}$$

$$y_F = 23,25 \text{ mm}$$

$$h_P = 303,22 \text{ mm}$$

$$L_R = 354 \text{ mm}$$



Poté dosazením nevzdálenější souřadnice do rovnice 5.3 získáme:

$$d_{pmax} = \sqrt{354^2 - (198,5 + 114,7 - 40,2)^2 + (114,6 + 66,2 - 23,2)^2} - 303,2 = -142,1 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Naopak nejbližší souřadnice:

$$x = -114,748 \text{ mm}$$

$$y = -66,25 \text{ mm}$$

$$d_{pmin} = \sqrt{354^2 - (198,5 - 114,7 - 40,2)^2 + (114,6 - 66,2 - 23,2)^2} - 303,2 = 47,2 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Hodnota  $d_{pmax}$  udává polohu vozíku o -142,113 mm menší, než byla na nulové souřadnici a  $d_{pmin}$  zase naopak. Potom tedy jejich absolutní součet udává celkový rozsah, který vozík urazí při přejezdu přes celý pracovní stůl.

$$d_{pcelk} = d_{pmax} + d_{pmin} = 142,113 + 47,2 = 189,313 \text{ mm}$$

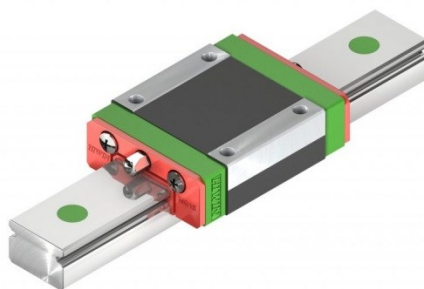
Společně se zadanou výškou pracovního prostoru  $h_{prac}$  dostaneme celkový maximální zdvih vozíku:

$$h_{MAX} = d_{pcelk} + d_{pmin} = 189,313 + 380 = 569,313 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Jako vedení vozíku bylo zvoleno lineární vedení HIWIN HGN12C1R620 (obr. 28). Zaručuje přesnost a tuhost vedení vozíku. Délka vozíku je 34,7 mm, kde společně s  $h_{MAX}$  dostaneme minimální délku vedení  $L_{MIN}$ .

$$L_{MIN} = h_{MAX} + 34,7 = 569,313 + 34,7 = 604,013 \text{ mm} \quad (6.4)$$

Nejbližší vyšší délka vedení podle katalogu výrobce je zvolených 620 mm.



Obr. 28 lineární vedení HIWIN HGN12C

### 6.3 Návrh a výpočet pohonu efektoru

Pro návrh pohonu je podstatné nejprve určit hmotnosti jednotlivých sestav, ty byly zjištěny pomocí programu Autodesk Inventor 2013, ve kterém byl také vytvořen celý model 3D tiskárny.

#### 6.3.1 Výpočet minimálních požadavků pohonu

Využitím odvozených rovnic statického, kinematického a dynamického hlediska získáme potřebný statický a dynamický moment motoru.

$$m_V = 0,072 \text{ kg}$$

$$m_T = 0,230 \text{ kg}$$

$$m_G = 0,474 \text{ kg}$$

$$m_{GT} = 0,015 \text{ kg}$$

$$r_R = 6,11 \text{ mm}$$

Kde  $m_T$  je hmotnost efektoru s hlavou pro tisk,  $m_G$  hmotnost efektoru s hlavou pro gravírování a  $m_{GT}$  hmotnost ramene. Dosazením rovnic 5.4, 5.5, 5.6 a 5.7 do rovnic 5.11, 5.12 a 5.13 dostaneme:

$$F_{aV} = F_{GT} + \frac{g \cdot m}{6} \quad (6.5)$$

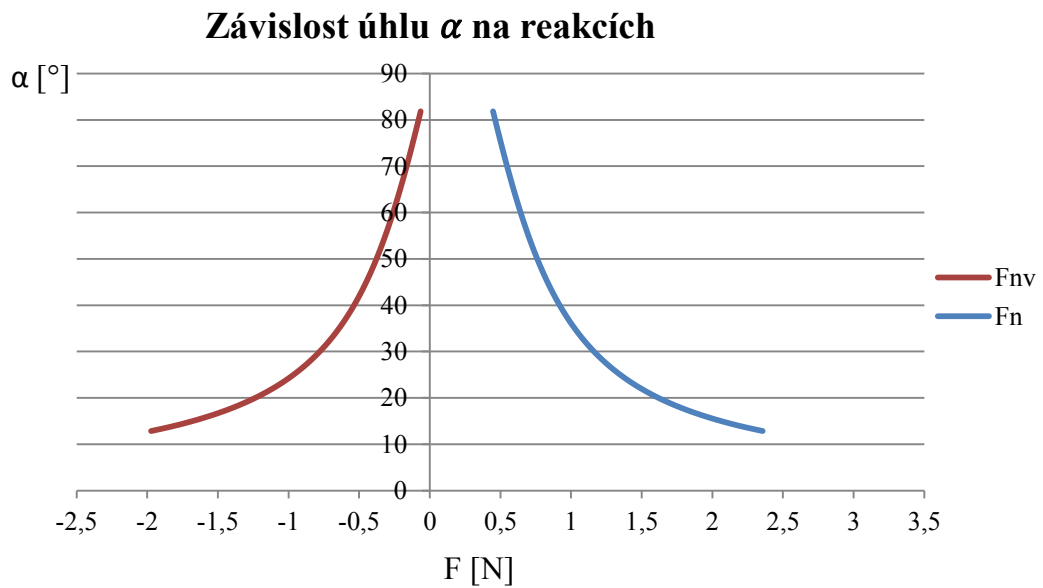
$$F_{NV} = \frac{F_{GT} \cdot \frac{L_R}{2} \cdot \cos \alpha - (F_{GT} + F_G) \cdot x}{y} \quad (6.6)$$

$$F_N = \frac{a \cdot m}{6} - F_{NV} \quad (6.7)$$

Kde za hmotnost efektoru  $m$  bude nejprve dosazena  $m_T$ :

$$F_{aV} = F_{GT} + \frac{g \cdot m_T}{6} = 0,015 \cdot 9,81 + \frac{9,81 \cdot 0,23}{6} = 0,5232 \text{ N} \quad (6.8)$$

Neznáme  $F_{NV}$  a  $F_N$  se mění v závislosti na úhlu naklonění  $\alpha$ , proto byly hodnoty vypočteny v programu Microsoft Excel a vykresleny do grafu. Do výpočtů byl zadán úhel naklonění v intervalu  $[81,8^\circ; 27,07^\circ]$ , což je úhel pod kterým se efektor přesune přes celý pracovní stůl.



Obr. 29 graf průběhu reakcí  $F_{NV}$  a  $F_N$

Převod mezi motorem a vozíkem ramene je realizován synchronním řemenem 2MGT3-6 o délce 1850 mm a řemenicí s profilem GT2 o dvaceti zubech 20-2GT-6.

Dosazením do rovnice 5.14 získáme moment potřebný ke zvedání vozíku:

$$M_{V+} = (m_V \cdot g + 2 \cdot F_{aV}) \cdot r_{\check{R}}$$

$$M_{V+} = (0,072 \cdot 9,81 + 2 \cdot 0,5232) \cdot 0,00611 = 0,0107 \text{ Nm} \quad (6.9)$$

Stejně tak do rovnice 5.15 pro spouštění vozíku:

$$M_{V-} = (2 \cdot F_{aV} - m_V \cdot g) \cdot r_{\check{R}}$$

$$M_{V-} = (2 \cdot 0,5232 - 0,072 \cdot 9,8) \cdot 0,00611 = 0,00207 \text{ Nm} \quad (6.10)$$

Následně rovnice 5.16 pro výpočet potřebného statického momentu motoru:

$$M_{MST} = \frac{M_{V+}}{\eta_c} = \frac{0,0107}{0,95} = 0,0112 \text{ Nm} \quad (6.11)$$

Kde  $\eta_C$  je celková účinnost získaná:

$$\eta_C = \eta_P \cdot \eta_V \cdot \eta_L^2 = 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,99^2 = 0,95 \quad (6.12)$$

$\eta_P = 0,99$  [-] účinnost řemenového převodu

$\eta_V = 0,98$  [-] účinnost valivého vedení

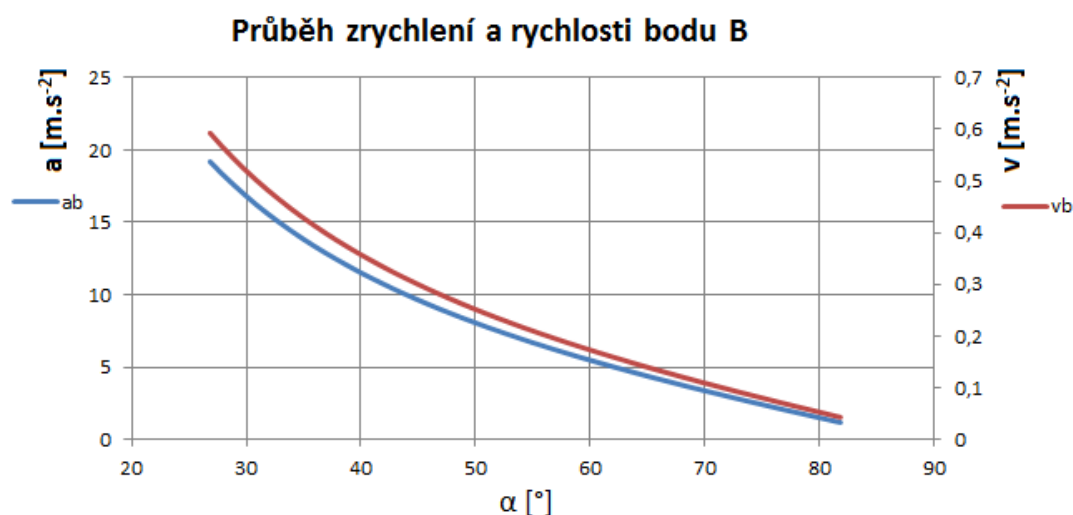
$\eta_L = 0,99$  [-] účinnost ložisek

V zadání práce je specifikována nejvyšší rychlost tisku  $v$ . Dále bylo určeno největší zrychlení efektoru  $a$ . Tyto hodnoty byly dosazeny do rovnic 5.17, 5.19 kde:

$$a = 10\,000 \text{ mm.s}^{-2}$$

$$v = 300 \text{ mm.s}^{-1}$$

Hodnoty byly vypočteny v programu Microsoft Excel a vykreslen graf, který udává průběh zrychlení a rychlosti bodu B z obr. 24.



Obr. 30 graf průběhu zrychlení a rychlosti vozíku ramene (bodu B)

Kde největší rychlost  $v_{Bmax}$  získáme dosazením hodnot do rovnice 5.17:

$$v_{Bmax} = \frac{-x_A}{\sqrt{L_R^2 - x_A^2}} \cdot v_A = \frac{-0,315}{\sqrt{0,354^2 - 0,315^2}} \cdot 0,3 = 0,592 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.13)$$

Následně můžeme určit otáčky motoru:

$$v_M = \frac{v_{Bmax}}{2 \cdot \pi \cdot r_{\ddot{R}}} = \frac{0,592}{2 \cdot \pi \cdot 0,00611} = 15,42 \text{ s}^{-1} \quad (6.14)$$

Největší zrychlení  $a_{BMAX}$  určeno dosazením rovnice 5.18 a 5.20 do 5.19:

$$a_B = -\frac{\frac{x_A}{\sqrt{L_R^2 - x_A^2}}}{x_A} \cdot v_A^2 - \frac{x_A}{\sqrt{L_R^2 - x_A^2}} \cdot a_A$$

$$a_B = -\frac{\frac{0,315}{\sqrt{0,354^2 - 0,315^2}}}{0,315} \cdot 0,3^2 + \frac{-0,315 \cdot 10}{\sqrt{0,354^2 - 0,315^2}} = 19,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (6.15)$$

Z vypočteného největšího zrychlení bodu  $B$  dosazením do rovnice 5.21 je možné určit největší úhlové zrychlení motoru:

$$\varepsilon_M = \frac{a_B}{r_{\check{R}}} = \frac{19,19}{0,00611} = 3\,142,266 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (6.16)$$

Dosazením rovnice 5.23 do 5.22 určíme dynamický moment motoru:

$$M_{MDT} = (J_{\check{R}} + J_K) \cdot \varepsilon_M + M_{V+}$$

Kde momenty setrvačnosti řemenice a kladky:

$$J_{\check{R}} = 0,207 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

$$J_K = 0,079 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

$$M_{MDT} = (2,07 \cdot 10^{-7} + 7,9 \cdot 10^{-9}) \cdot 3\,142,266 + 0,0107 = 0,0113 \text{ Nm} \quad (6.17)$$

Pokud do stejných rovnic dosadíme hmotnost efektoru s hlavou pro gravírování, dostaneme hodnoty:

$$M_{MSG} = \frac{M_{V+}}{\eta_C} = \frac{0,0155}{0,95} = 0,0163 \text{ Nm} \quad (6.18)$$

$$M_{MDG} = (2,07 \cdot 10^{-7} + 7,9 \cdot 10^{-9}) \cdot 3\,142,266 + 0,0163 = 0,0162 \text{ Nm} \quad (6.19)$$

### 6.3.2 Návrh pohonu

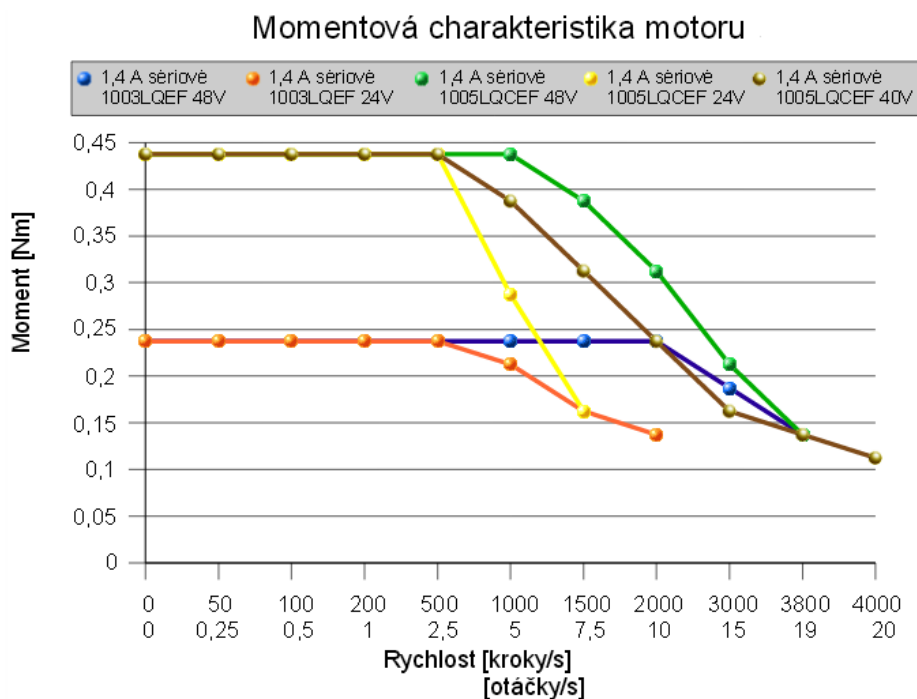
Pro pohon je použit krokový motor. Krokové motory jsou vhodné pro aplikace s potřebou přesného řízení při nízkých a středních rychlostech. Výhodou jsou nízké ceny a minimální požadavky na údržbu. Při aplikaci krokových motorů se obecně doporučuje

rezerva momentu 50% - 100%, pro dostatečnou rezervu momentu při např. rázově zvýšenému momentu zátěže. [20]

Jako napájení motoru je použito stejnosměrné napětí 24V. V porovnání vypočtených hodnot s momentovou charakteristikou obr. 31 je krokový motor Microcon SX17-1005LQCEF se sériovým zapojením naprosto dostačující. Základní parametry motoru jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 specifikace krokového motoru Microcon [20]

Typ	Statický moment	Jmenovitý proud	Odpor	Hmotnost	Délka kroku
	[Nm]	[A]	[Ω]	[kg]	[°]
SX17-1005LQCEF	0,52	1	5,9	0,3	1,8



Obr. 31 momentová charakteristika motoru[20]

Pro řízení motoru jsou použity drivery Allegro A4982, které umožňují mikrokrokování 1/16, tedy dokáží rozdělit jeden krok motoru na dalších šestnáct. Délka jednoho kroku motoru je 1,8°, pak tedy na jednu otáčku motor udělá 200 kroků. Celkový počet kroků potřebných na posuv o 1 mm v ose Z můžeme vypočítat:

$$k_z = \frac{k_M \cdot k_D}{z_R \cdot P_R} = \frac{200 \cdot 16}{20 \cdot 2} = 80 \text{ kroků} \quad (6.20)$$

Odtud můžeme vypočítat nejmenší vzdálenost na jeden krok v ose Z:

$$Z_{min} = \frac{1}{k_z} = \frac{1}{80} = 0,0125 \text{ mm} \quad (6.21)$$

Posuv osy Z na nejeden celý krok motoru:

$$Z_M = \frac{1}{\frac{k_M}{z_R \cdot P_R}} = \frac{1}{\frac{200}{20 \cdot 2}} = 0,2 \text{ mm} \quad (6.22)$$

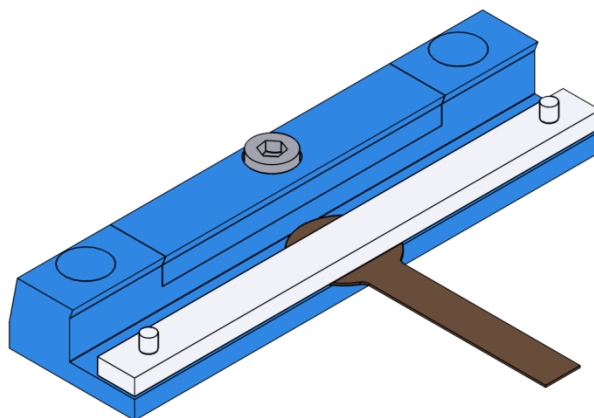
## 6.4 Návrh pracovního stolu

Pracovní stůl je pevně upevněn k rámu a zároveň umožňuje výměnu jednotlivých pracovních desek pro 3D tisk i gravírování. Skládá se ze dvou pevných a jedné posuvné čelisti pro montáž desek. Každá čelist je opatřena tlakovým senzorem FSR402 pro nastavení nulového bodu osy Z, který zde pracuje jako koncový spínač. Mezi vyhřívanou deskou pro 3D tisk a tlakovým senzorem je umístěna teflonová izolační podložka. Horní hrana každé čelisti je opatřena sraženým nosem pro přitlak pracovních desek. V tab. 8 jsou základní parametry tlakového senzoru.

Tab. 8 specifikace tlakového senzoru [21]

<b>Typ</b>	[-]	FSR402
<b>Rozsah detekce</b>	[g]	10 - 10 000
<b>Tloušťka</b>	[mm]	0,45
<b>Rozsah pracovní teploty</b>	[°C]	-30 – 70
<b>Životnost</b>	[-]	10 miliónů sepnutí

Při přemístění tiskové trysky nad pracovní stůl a tečování desky dojde k sepnutí obvodu a tím nastavení nulového bodu osy Z. Při výměně pracovních desek nemusí být dodržena vždy stejně přesná rovinnost pracovní plochy. Díky rozmístění tlakových senzorů ve třech bodech roviny je možné nastavit řídicí firmware tak, aby při nastavení nulového bodu tečoval pracovní desku v několika místech a tak určil i sklon pracovní desky. Následně pak pracovní software může korigovat tuto nerovnost a výsledný výrobek tak nebude ovlivněn.



Obr. 32 čelist s tlakovým senzorem a izolační podložkou

#### 6.4.1 Návrh vyhřívané desky

Vyhřívání pracovní desky pro 3D tisk je realizováno odporovým ohřevem pomocí tištěného spoje. Ten je umístěn na 3 mm tlusté hliníkové desce, která je pomocí čelistí upevněna k rámu. Deska je napájena stejnosměrným napětím 24V. Dokáže dosáhnout maximální teploty 180°. Na spodní části desky je umístěn termistor NTC 100K pro snímání teploty a spínání ohřevu.



Obr. 33 vyhřívaná deska MK3 ALU Dual Power [22]

Na vyhřívané desce je ještě umístěna pracovní podložka vyrobená z 2 mm tlustého hliníkového plechu nebo skla. Na ni je pak nanášena vrstva přípravku pro tisk.

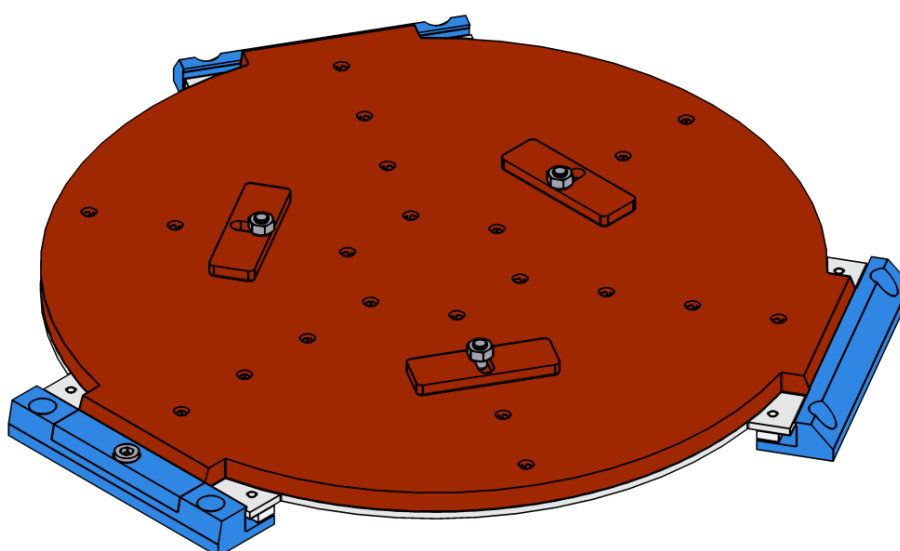


#### 6.4.2 Návrh gravírovacího stolu

Pracovní stůl pro gravírování je vyroben z bukového dřeva nebo překližky. Je opatřen soustavou děr pro montáž upínek. Ty jsou upevněny pomocí vratových šroubů.

Nastavení osy Z je zde realizováno pomocí kontaktu gravírovacího nástroje s obráběnou poměděnou deskou. Nástroj i deska jsou zapojeny do obvodu a při kontaktu dojde k sepnutí a tím detekování nulové souřadnice.

Pracovní stůl je upínán stejně jako deska pro 3D tisk pomocí čelistí a je posazen na vyhřívané položce.



Obr. 34 gravírovací stůl s čelistmi

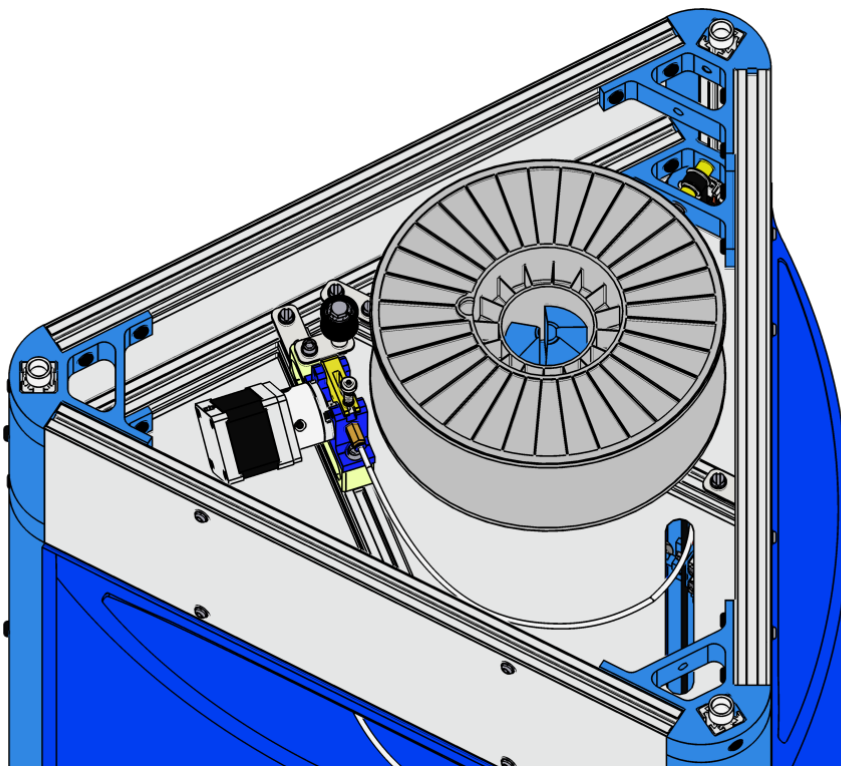
## 7. Design tiskárny

Krytování rámu tiskárny je realizováno hliníkovým plechem o tloušťce 1mm. Dolní část rámu tvoří uzavřený prostor pro umístění řídicí desky a zdroje. Synchronní řemen je v prostoru okolo pracovní desky opatřen ochranným krytem proti prachu a nečistotám.

Tiskárna disponuje displejem RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller a ovládacím kolečkem pro ovládání a kontrolu tiskárny. Také je opatřena slotem pro SD kartu.

Krytování pracovního prostoru je provedeno tvarovanou polykarbonátovou deskou o tloušťce 3 mm. Její upevnění k rámu je realizováno pomocí magnetu. V horní části desky je otvor pro volnou ventilaci. Čelní kryt pracovního prostoru je svisle výsuvný.

Horní část tiskárny je také opatřena uzavřeným prostorem s odnímatelným krytem. Uvnitř je upevněn extruder a nosič cívky s materiálem pro tisk. Ten pomocí ložiska umožňuje volné otáčení materiálu a je upevněn k rámu.



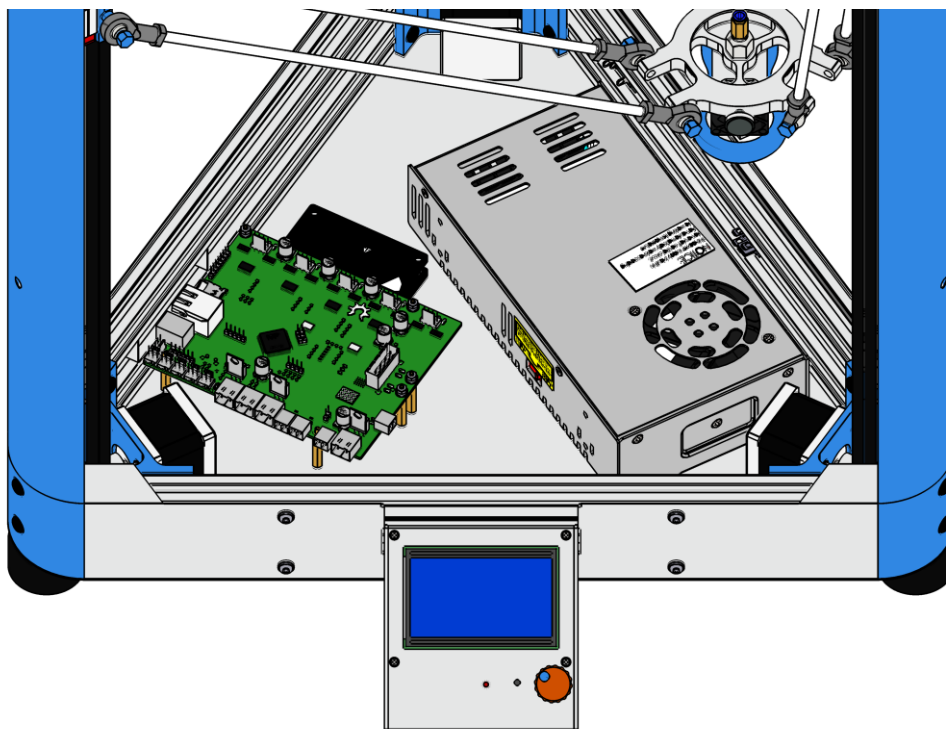
Obr. 35 prostor s extruderem a nosičem cívky materiálu

Ukázky provedení designu jsou uvedeny v příloze.

## 8. Elektronika

Jako řídicí deska tiskárny je použita Smoothieboard. Ta může s použitím regulátoru být napájena napětím až 24 V. Umožňuje řízení pěti krokových motorů, připojení termistorů, koncových spínačů a její tři MOSFET tranzistory můžou spínat obvody o napětí 24 V a proudu 12 A. To je ideální k napájení vyhřívané desky nebo motoru pro gravírování. Její přesné specifikace jsou uvedeny v příloze. Pro připojení displeje je potřebný adapter.

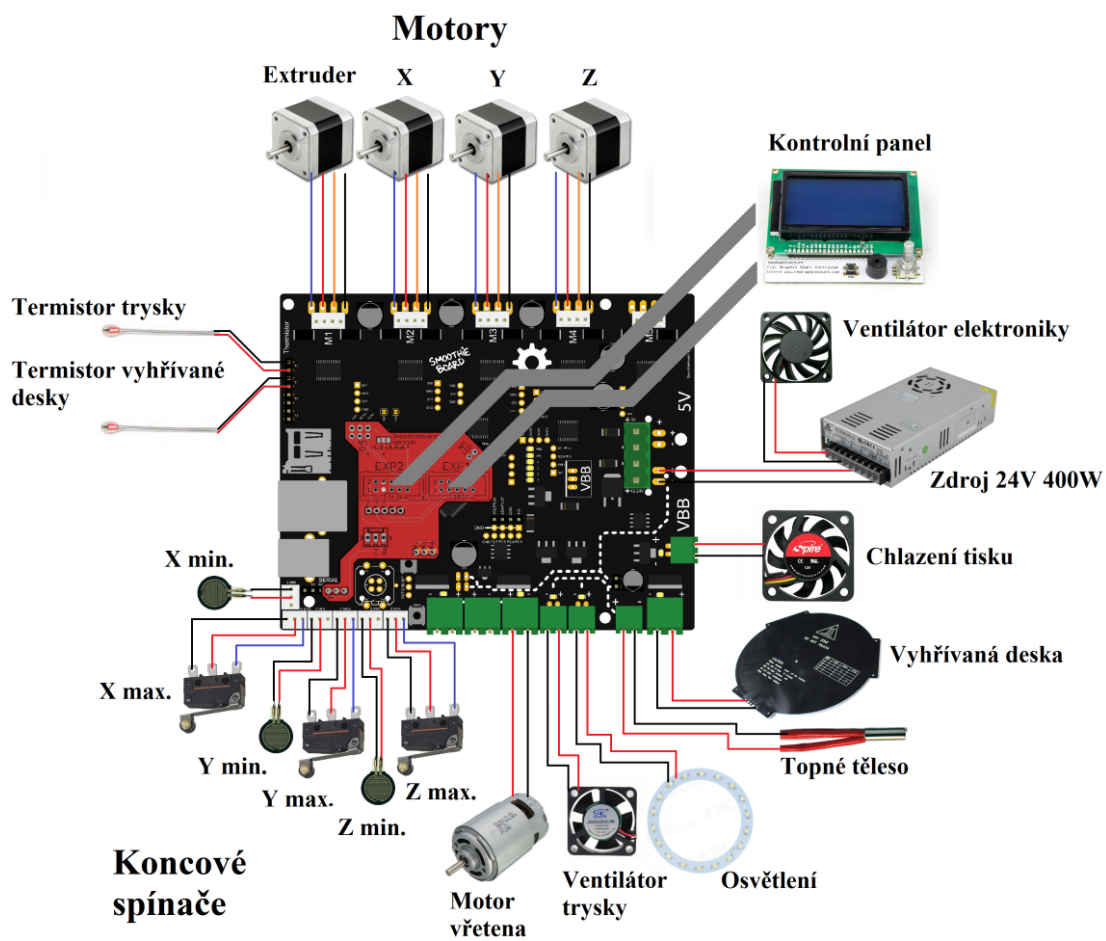
Jako koncové spínače maximální polohy vozíku slouží mikrospínač Omron D2SW-P2L2T opatřen kladkou. Je umístěn na konci lineárního vedení. Pracovní prostor je osvětlen Led kruhem s 36 SMD diodami o celkovém výkonu 18 W.



Obr. 36 pohled na umístění elektroniky

K napájení slouží zdroj o napětí 24 V a výkonu 400 W. Prostor pro elektroniku je opatřen ventilátorem 70x70 mm pro nucené chlazení.

Kabely výměnných hlav jsou vedeny společně s bowdenem a poté drážkou v hliníkovém profilu k řídicí desce. Tiskárna je opatřena kolébkovým a napájecím konektorem IEC 60320 pro síťové připojení.



Obr. 37 zapojení elektroniky

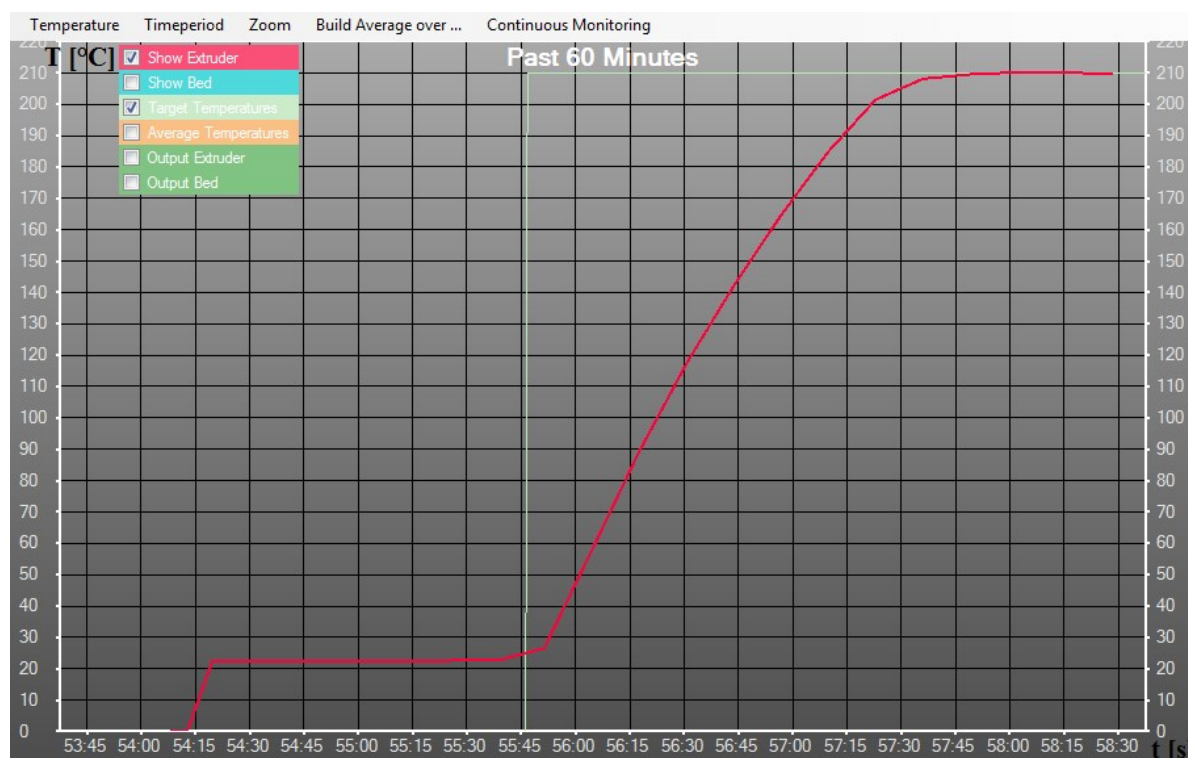
## 9. Měření

Tato kapitola se zabývá měřením některých uzlů reálné tiskárny typu RepRap. Tedy tiskárny postavené na otevřené platformě ovládané free softwarem. Získaná data jsou použita jak pro reálnější navození počátečních podmínek MKP analýzy ohřevu a výdrže na teplotě trysky, tak pro určení potřebného pohonu pro extruder.

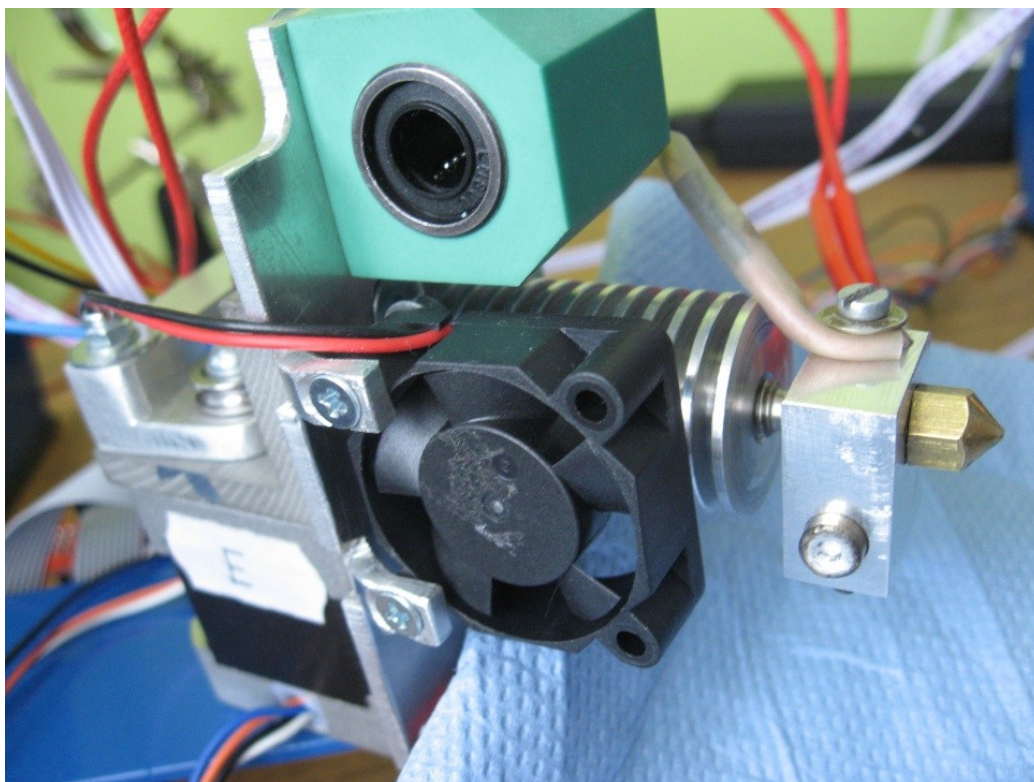
### 9.1 Měření ohřevu trysky

Měření bylo provedeno v programu Repetier-Host, který slouží k řízení 3D tiskáren. Počáteční teplota ohřevu byla 22°C, cílová teplota 210°C. Jak je vidět na obr. 37 křivka má parabolický průběh a doba ohřevu je přibližně 2 min a 20 s.

K ohřevu trysky bylo použito topné těleso s keramickým jádrem o výkonu 40 W a pracovním napětí 12 V. Teplota byla měřena odporovým teplotním čidlem ve skleněném pouzdru EPCOS NTC 100K.



Obr. 38 graf vykreslený programem Repetier-Host



Obr. 39 ukázka trysky

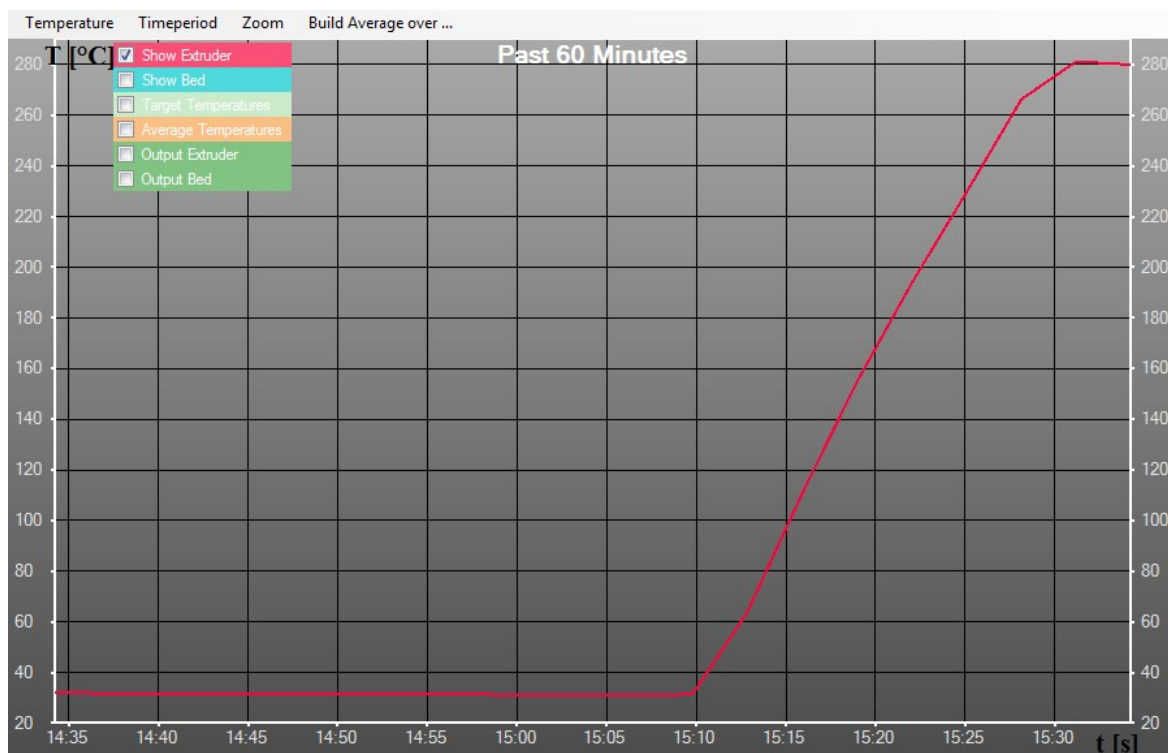
## 9.2 Měření ohřevu topného tělesa

Měření rychlosti ohřevu topného tělesa bylo realizováno demontáží topného tělesa z vyhřívaného bloku spolu s termistorem. Aby nebyl styk mezi součástmi jen bodový, byla mezi těleso a termistor nanesena teplovodivá pasta. Počáteční teplota 30°C, cílová teplota 280°C.

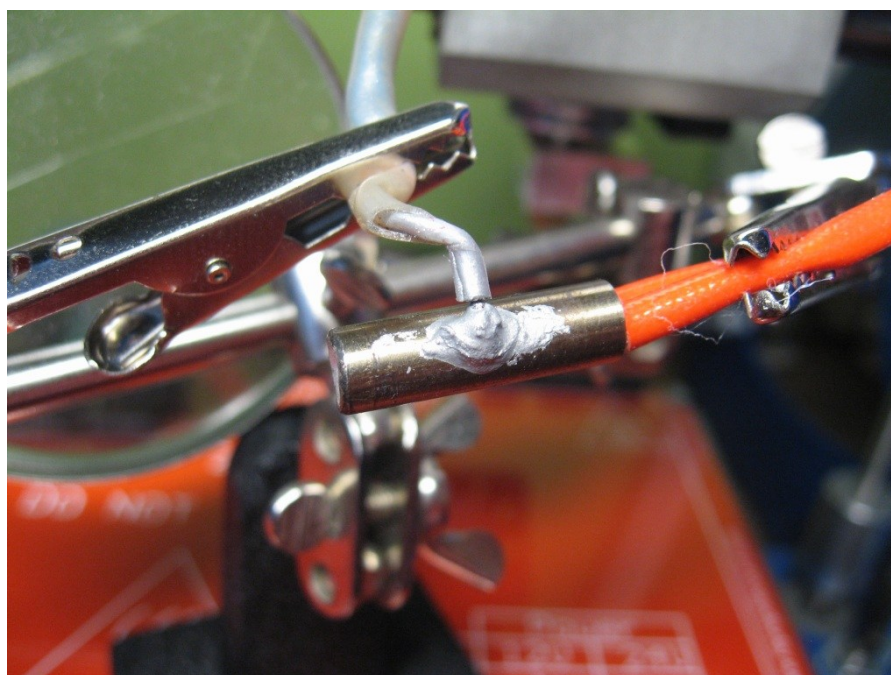
Jak je vidět z obr. 39 požadované teploty bylo dosaženo přibližně za 25s. Průběh křivky není tak plynulý na rozdíl od předchozího měření. Je to způsobeno termistorem, který pracuje na principu změny odporu při změně teploty. Nárůst odporu je zde skokový, proto při spínání topného tělesa vznikají mírné nerovnosti.

Tyto nerovnosti jsou v předchozím měření minimální díky prostupu tepla od tělesa k termistoru.





Obr. 40 průběh ohřevu



Obr. 41 ukázka měření ohřevu topného tělesa 12V 40W termistorem NTC 100K

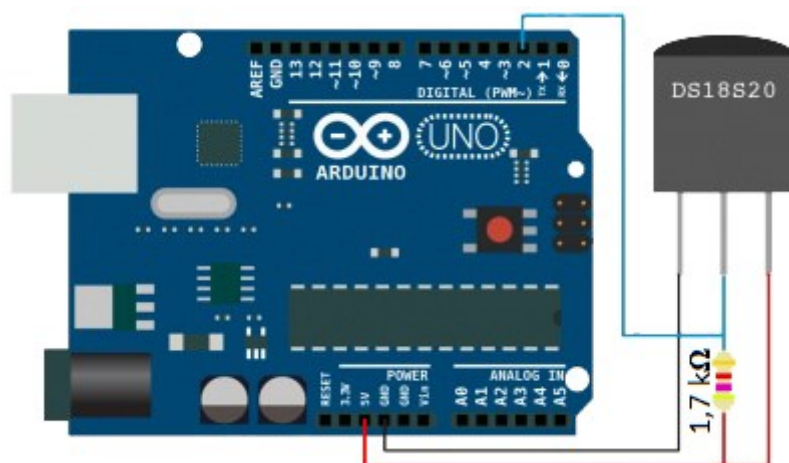
### 9.3 Měření průběhu teploty chladiče

Měření bylo provedeno pomocí programovatelné desky Arduino Uno. Arduino je elektronická open-source platforma pracující na mikrokontroleru ATmega od firmy Atmel

s grafickým vývojovým prostředím, které vychází z prostředí Wiring. Deska obsahuje 14 digitálních vstupů/výstupů, které je možno použít jako vstup do počítače nebo pro ovládání různých připojených zařízení. Také obsahuje 6 analogových vstupů. Ty umožňují měřit vstupní napětí. [24]

Nejprve byl nahrán zdrojový kód na řídicí desku, poté zapojen obvod. Jako senzor byl použit Dallas DS18S20. Kalibrace byla provedena porovnáním teploty na senzoru s laboratorním teploměrem. Měřeno bylo dolní čelo chladiče.

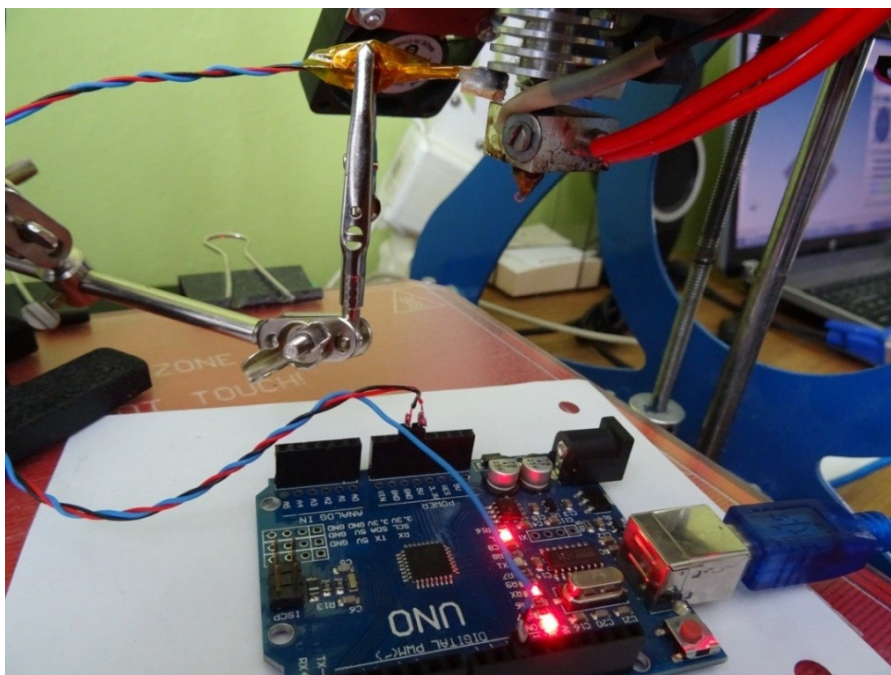
Tryska tiskárny byla vyhřívána po dobu 10 minut, což je doba, kdy je teplota dostatečně ustálena. Poté byl přiložen senzor, po ustálení teploty, byla zapsána hodnota 42,8 °C.



Obr. 42 zapojení Arduina a senzoru Dallas [25]

Toto měření je pouze orientační ke zjištění teploty chladiče a následnému porovnání s MKP analýzou. Zdrojový kód pro řízení obvodu je uveden v příloze.

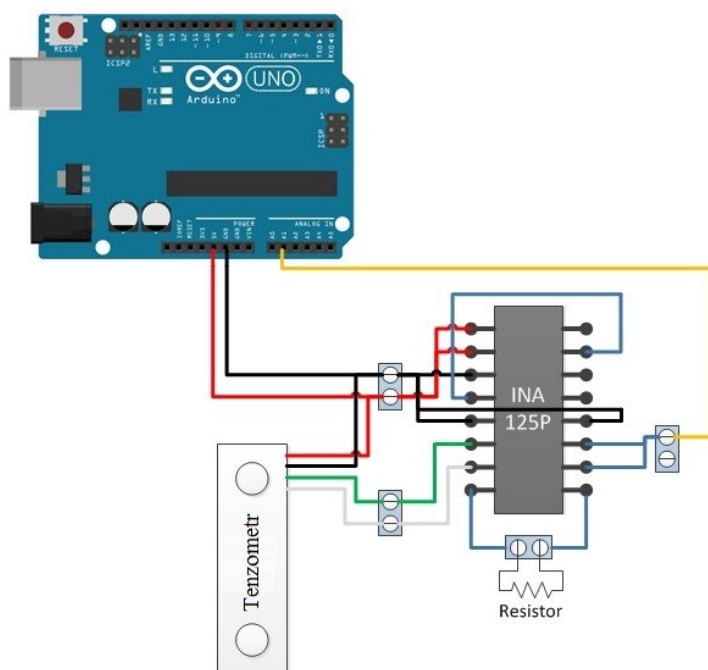




Obr. 43 ukázka měření

#### 9.4 Měření odporu materiálu při průchodu tryskou

Měření bylo realizováno vložení tenzometru s maximálním zatížením 5kg, mezi sestavu trysky a extruder. Tenzometr byl zapojen na zesilovač INA125P a měření bylo zaznamenáváno pomocí Arduina UNO, které řídilo celý obvod. Použitý rezistor určuje velikost zesílení, které je možné v rozsahu od 4 krát až 10 000 krát. Použit byl rezistor s hodnotou 33 Ohm, který zajistil zesílení 1822,18 krát.



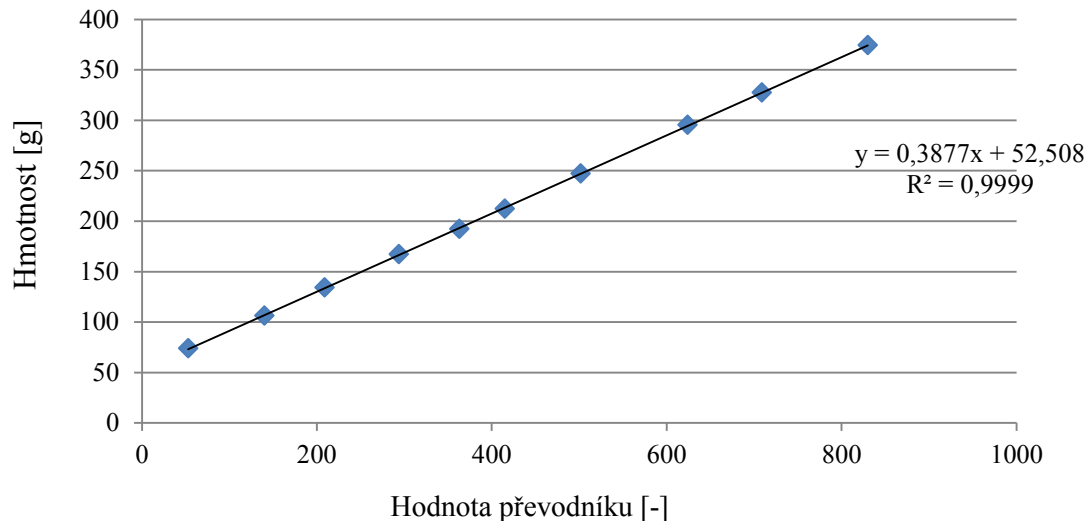
Obr. 44 zapojení tenzometru [26]

Nejprve bylo podstatné kalibrovat tenzometr na sestavu, ve které byl montován. V místě uložení sestavy trysky byly postupně zavěšovány předměty o různé hmotnosti a zaznamenávána jak jejich hmotnost, tak hodnota na převodníku. Následně byla sestavena tabulka a hodnoty byly vypsány do grafu. Jednotlivé body byly proloženy regresní přímkou a pomocí rovnice přímky byla vypočtena hmotnost naměřená tenzometrem.

Tab. 9 tabulka kalibrace tenzometru

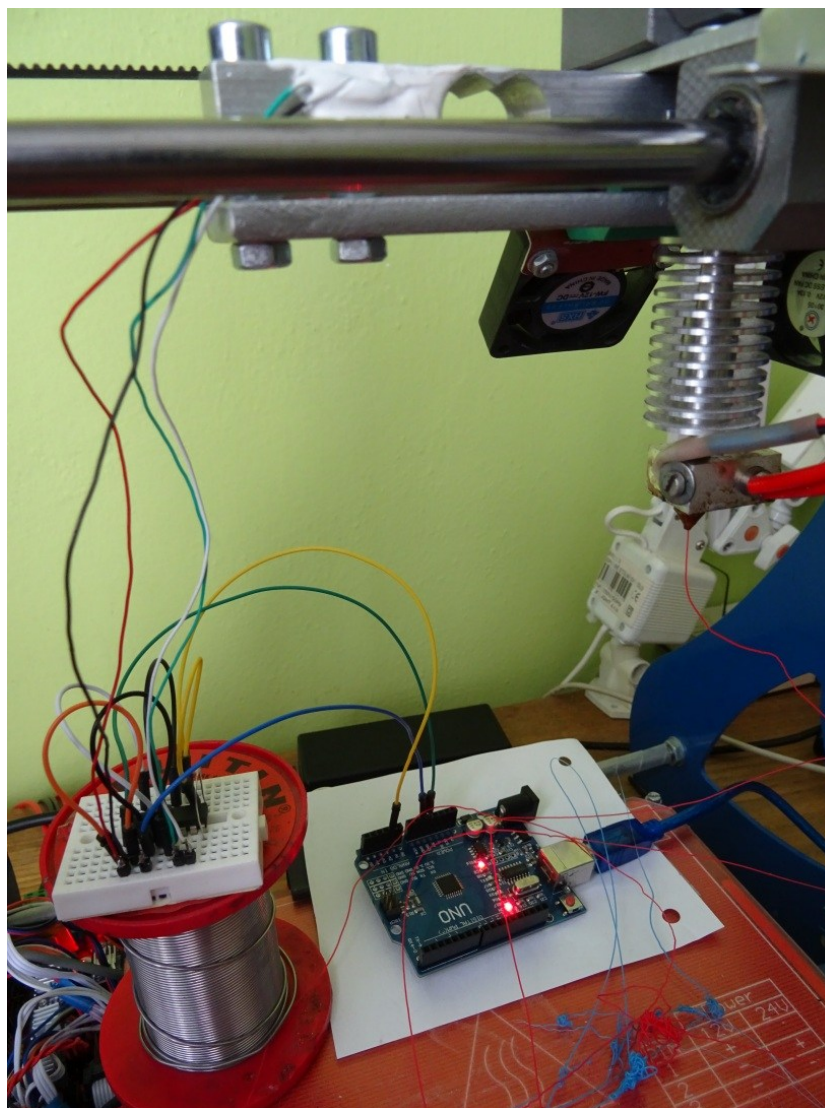
Měření	Hmotnost zátěže [g]	Hodnota převodníku [-]	Vypočtená hmotnost [g]	Odchylka [g]	Odchylka [%]
1	53	73,72	54,71241	1,712406	2,322852
2	209	134,133	210,5365	1,536497	1,145503
3	140	106,105	138,2435	-1,75651	-1,65545
4	294	167,166	295,739	1,738973	1,040267
5	415	212,213	411,9293	-3,07067	-1,44698
6	502	247,246	502,2904	0,290431	0,117466
7	624	295,294	626,2213	2,221305	0,752235
8	709	327,326	708,8419	-0,15811	-0,0483
9	830	374,373	830,1909	0,190869	0,050984
10	363	192,192	360,2889	-2,71112	-1,41063

Kalibrace tenzometru



Obr. 45 graf kalibrace tenzometru

Následně byly testovány materiály ABS a PLA firmy Mladeč. Průměr materiálu 1,75 mm, průměr trysky 0,3 mm. Vzorky byly testovány ve výrobcem doporučeném rozsahu teplot a to jak v minimální, maximální tak i ve střední hodnotě. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 10.



Obr. 46 ukázka měření

Tab. 10 naměřené hodnoty

Materiál		PLA			ABS		
<b>Teplota</b>	[C°]	190	205	220	220	230	240
<b>Zatížení</b>	[N]	8,304	7,619	6,33	8,541	8,414	7,933

Zdrojový kód pro řízení obvodu je uveden v příloze.

## Závěr

Cílem této práce byl návrh 3D tiskárny s paralelní kinematikou a možností výměny pracovní hlavy pro gravírování desek plošných spojů. Nejprve jsou popsány vybrané technologie 3D tisku a poté rozbor možných kinematických struktur řízení stroje. V dalších kapitolách je provedena MKP analýza tiskové trysky spolu s návrhem hlavy pro gravírování. Následně konstrukce rámu, pracovní desky, spolu s návrhem a výpočtem pohonu stroje i extruderu. V následující části je popsán design stroje, návrh a zapojení elektroniky. V poslední kapitole je popsána experimentální část, měření doby ohřevu trysky, topného tělesa a měření odporu materiálu v trysce pomocí tenzometru.

Výstupem práce je návrh 3D tiskárny s paralelní kinematikou o pracovním prostoru s kruhovou základnou o průměru 265 mm a výšce 380 mm. V návrhu byla zohledněna rychlost tisku  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$  se zrychlením efektoru  $10 \text{ m.s}^{-2}$ . Rozlišení tiskárny je v ose Z od 0,0125 mm, tedy nejmenší možná výška tisku.

3D tiskárna je komplexní stroj a je důležité při návrhu také zohlednit technologii tisku a jeho jednotlivé parametry. Cena tiskárny se pohybuje okolo 28 500 Kč. V ceně je zahrnut všechn materiál, komponenty a elektronika pro stavbu tiskárny. Některé komponenty například řídicí deska a vyhřívaná deska se vyrábí a prodává v zahraničí, proto její cena se odvíjí podle aktuálního kurzu.

Mechanismus tiskárny nepřenáší žádná velká zatížení, proto je z velké části naddimenzován. Proto je možno některé konstrukční uzly nahradit jednodušším a levnějším řešením, například lineární vedení svislých vozíků. Nicméně náhrada například za lineární tyče by způsobila nižší přesnost vedení, také by vyžadovala jinou konstrukci rámu. Pokud by také byl přesně specifikován požadavek nástroje pro gravírovací hlavu, bylo by možné vřetenem opatřit výměnou kleštinou pro dané průměry a tak snížit zatížení vřeten. Také velká délka bowdenu, která by nemusela být vhodná z důvodu odporu a stlačení materiálu. Nicméně ověření zda jsou tyto poznatky správné, vyžaduje nasazení stroje do provozu a jeho ověření.

## Seznam použité literatury

- [1] Nekonvenční metody obrábění 9. díl. *Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [2] Informace o technologiích 3D tisku. *Easy CNC* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [3] How does 3D printing — laser sintering — work? *Make parts fast* [online]. 2013 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.makepartsfast.com/2013/03/5129/how-does-3d-printing-laser-sintering-work/>
- [4] FFF vs. SLA vs. SLS: 3D Printing. *SD3D printing* [online]. 2013 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.sd3dprinting.com/fff-vs-sla-vs-sls/>
- [5] 3D Printers Explained: Cartesian, Delta, Polar, Scara. *All3DP* [online]. 2015 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <https://all3dp.com/known-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/>
- [6] Introducing Galil's New H-bot Firmware. *GALIL* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.galilmc.com/news/whats-new-galil/introducing-galils-new-h-bot-firmware>
- [7] Linear Delta Printer Kinematics. *RepRap WIKI* [online]. 2012 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/Linear\\_Delta\\_Printer\\_Kinematics](http://reprap.org/wiki/Linear_Delta_Printer_Kinematics)
- [8] The road ahead for 3-D printers. *PWC* [online]. 2013 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/issue2/features/future-3d-printing.html>
- [9] The Polar Cloud. *Polar 3D* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://polar3d.com/polar-cloud/>

- [10] Bowden Extruder. *Arxterra* [online]. 2014 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.arxterra.com/bowden-extruder/>
  
- [11] Gdstime 30mm X 30mm X 10mm Brushless Cooling Fan. *Tera Peak* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.terapeak.com/worth/gdstime-30mm-x-30mm-x-10mm-1-inch-small-12v-dc-brushless-cooling-fan/301863086295/>
  
- [12] Vzduch. *ConVERTER* [online]. 2002 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
  
- [13] XT-CF20. *ColorFab* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://colorfabb.com/xt-cf20>
  
- [14] Eastar copolyester 6763. *EASTMAN* [online]. 2012 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: [http://www.eastman.com/Literature\\_Center/M/MBS80.pdf](http://www.eastman.com/Literature_Center/M/MBS80.pdf)
  
- [15] Gear Ratio 5:1 Planetary Gearbox. *Stepperronline* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.omc-stepperonline.com/gear-ratio-51-planetary-gearbox-with-nema-17-bipolar-stepper-17hs151684spg5-p-143.html>
  
- [16] Plošné spoje - obecné informace. *A3* [online]. 2009 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.a3.cz/plosne-spoje-informace.php>
  
- [17] Printed Circuit Fabrication Tool Set. *Precis Bits* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.precisebits.com/applications/pcbtools.htm>
  
- [18] DC motor Série 775. *Transmotec* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.transmotec.cz/stejnosmerne-motory/serie-775.html>
  
- [19] Jacobs Chuck. *Jacobs Chuck* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.jacobschuck.com/MagentoShare/media/documents/jacobs-catalog.pdf>

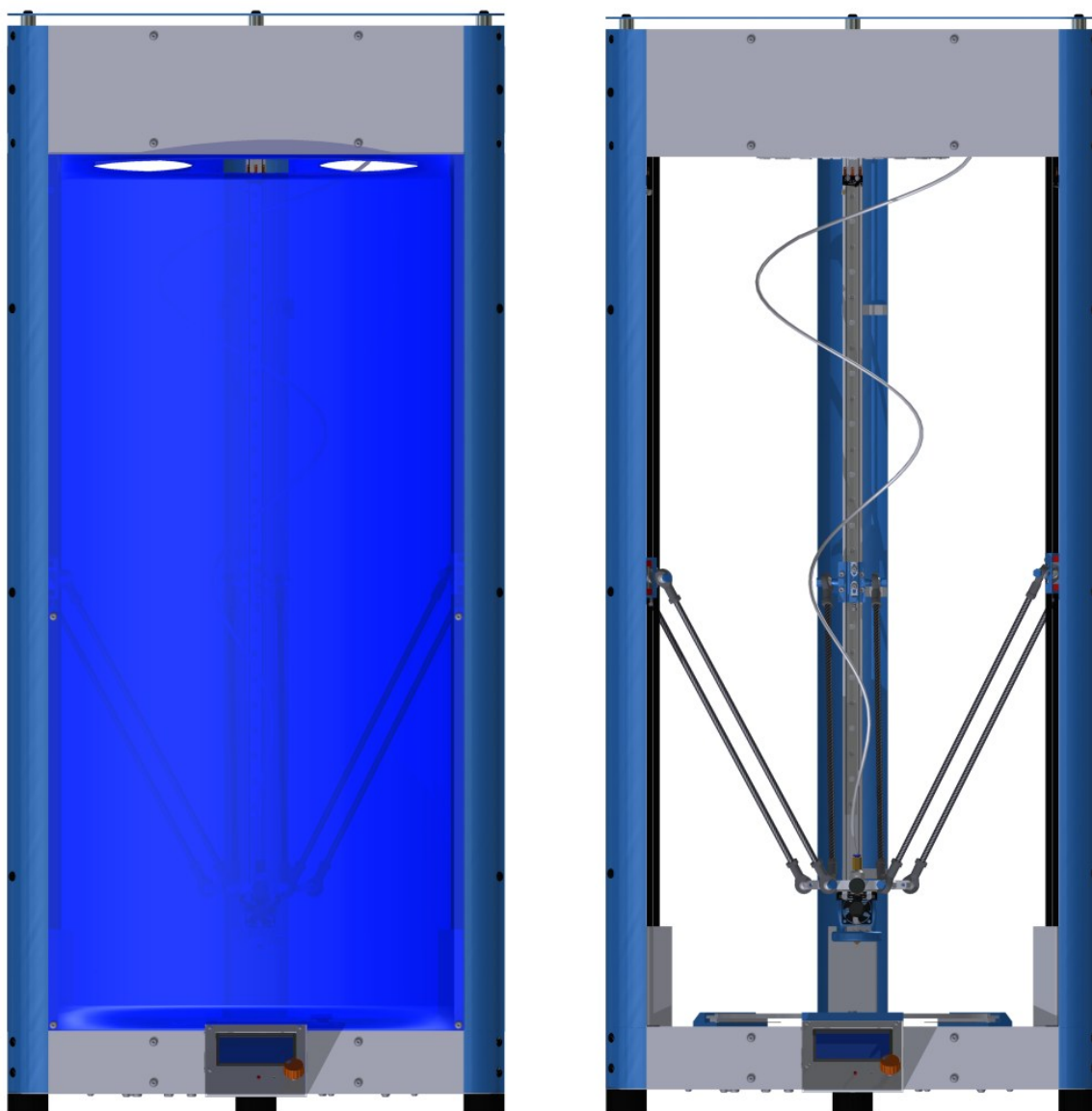
- [20] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [21] Aplikovaná mechanika. *Fs.vsb* [online]. Ostrava [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: [http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Aplikovana\\_mechanika\\_03\\_prednaska.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Aplikovana_mechanika_03_prednaska.pdf)
- [22] *Microcon* [online]. Praha 9, 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://microcon.cz/>
- [23] FSR 402. *Trossen Robotics* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf>
- [24] MK3 ALU-Heatbed Dual Power. *RepRap WIKI* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/PCB\\_Heatbed#MK3\\_ALU-Heatbed](http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed#MK3_ALU-Heatbed)
- [25] What is Arduino? *Arduino* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [26] Arduino zapojení pro měření teploty s DS18S20. *Blog.ijacek* [online]. 2012 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://blog.ijacek007.cz/Arduino/arduino-zapojeni-pro-mereni-teploty-s-ds18s20>
- [27] Arduino Load Cell - Project Stage 2. *FlowRC* [online]. 2014 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: [http://flowrc.co.uk/load\\_cell\\_stage\\_2.html](http://flowrc.co.uk/load_cell_stage_2.html)

## **Seznam příloh**

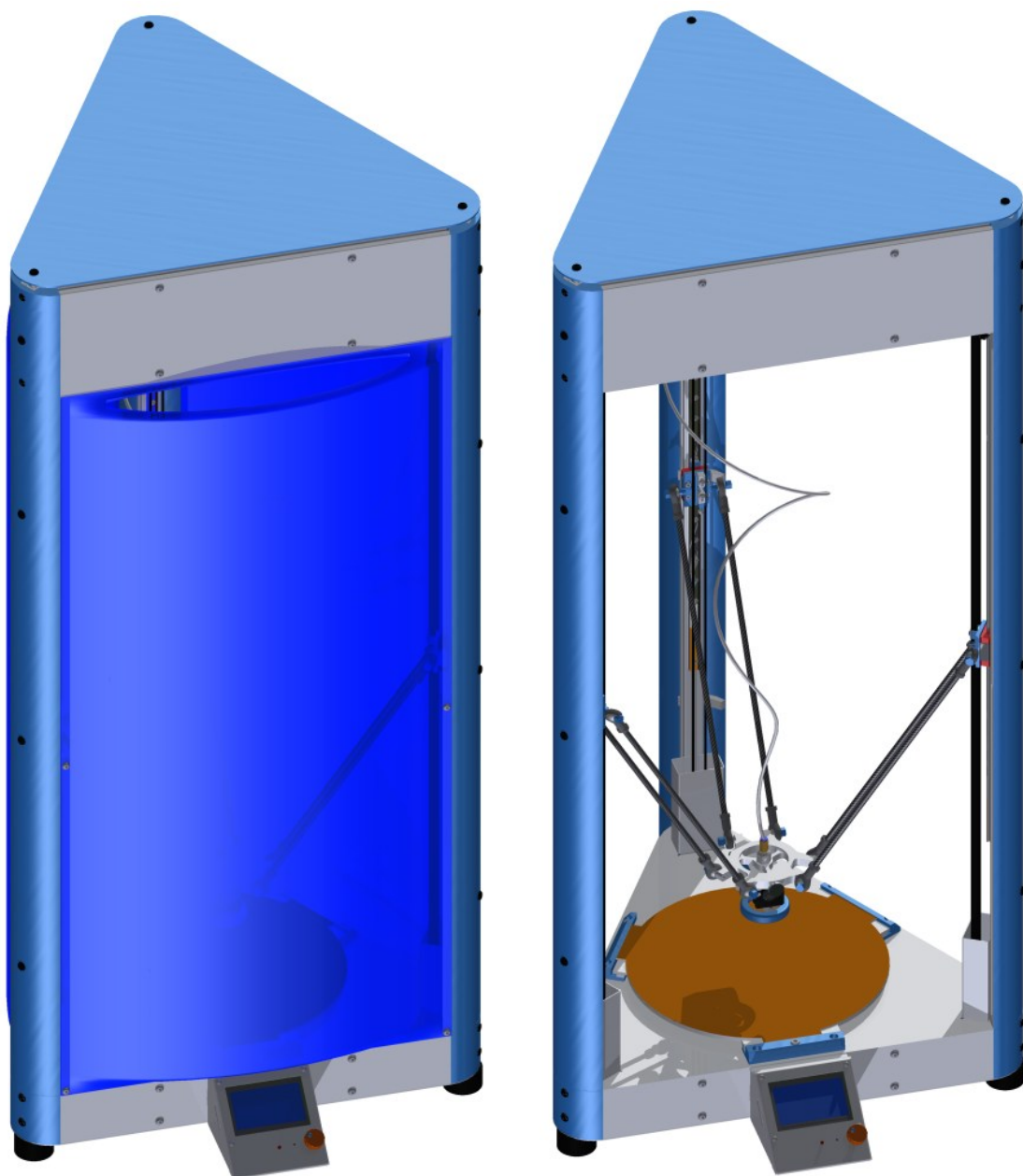
- A Obrázková dokumentace tiskárny
- B Zdrojový kód pro měření teploty
- C Zdrojový kód pro měření tenzometrem
- D Sestava 3D tiskárny (výkres formátu A0)
- E Efektor - 3D hlava (výkres formátu A2)
- F Efektor – Gravírovací hlava (výkres formátu A3)
- G Rameno (výkres formátu A3)
- H Rám (výkres formátu A1)
- I Extruder (výkres formátu A3)
- J Nosič cívky filamentu (výkres formátu A3)
- K Sestava trysky (výkres formátu A4)
- L Gravírovací stůl (výkres formátu A3)
- M Dolní spojka profilu (výkres formátu A3)
- N CD-ROM



## Příloha A



Čelní pohled na tiskárnu s krytováním a bez



Pohled ze strany

## Příloha B

```
#include <OneWire.h>
```

```
OneWire ds(10); // on pin 10 (a 4.7K resistor is necessary)
```

```
void setup(void) {  
    Serial.begin(9600);  
}
```

```
void loop(void) {  
    byte i;  
    byte present = 0;  
    byte type_s;  
    byte data[12];  
    byte addr[8];  
    float celsius;
```

```
    if ( !ds.search(addr)) {  
        ds.reset_search();  
        delay(100);  
        return;  
    }
```

```
    for( i = 0; i < 8; i++) {  
        Serial.write(' ');  
    }
```

```
    if (OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7]) {  
        return;  
    }  
    Serial.println();
```

```
    // the first ROM byte indicates which chip  
    switch (addr[0]) {
```

```

case 0x10:
    type_s = 1;
    break;
case 0x28:
    Serial.println(" Chip = DS18B20");
    type_s = 0;
    break;
case 0x22:
    Serial.println(" Chip = DS1822");
    type_s = 0;
    break;
default:
    Serial.println("Device is not a DS18x20 family device.");
    return;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44, 1);    // start conversion, with parasite power on at the end

delay(100);    // maybe 750ms is enough, maybe not
// we might do a ds.depower() here, but the reset will take care of it.

present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE);    // Read Scratchpad

for ( i = 0; i < 9; i++) {    // we need 9 bytes
    data[i] = ds.read();
}

// Convert the data to actual temperature
// because the result is a 16 bit signed integer, it should
// be stored to an "int16_t" type, which is always 16 bits
// even when compiled on a 32 bit processor.
int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];

```

```

if (type_s) {
  raw = raw << 3; // 9 bit resolution default
  if (data[7] == 0x10) {
    // "count remain" gives full 12 bit resolution
    raw = (raw & 0xFFF0) + 12 - data[6];
  }
} else {
  byte cfg = (data[4] & 0x60);
  // at lower res, the low bits are undefined, so let's zero them
  if (cfg == 0x00) raw = raw & ~7; // 9 bit resolution, 93.75 ms
  else if (cfg == 0x20) raw = raw & ~3; // 10 bit res, 187.5 ms
  else if (cfg == 0x40) raw = raw & ~1; // 11 bit res, 375 ms
  /// default is 12 bit resolution, 750 ms conversion time
}
celsius = (float)raw / 16.0;
Serial.print(celsius);
}

```

## Příloha C

```
/*
Stage 1 sketch for the load cell
Stage 1 simply sets up the load cell and take an analogue reading.
*/

int loadCell = A1;          //output from load cell
int analogValue = 0;

const int numReadings = 10; //determines the number of values in the rolling average
int readings[numReadings];  // the readings from the analog input
int index = 0;              // the index of the current reading
int total = 0;              // the running total
int rollingAverage = 0;     // the rolling average reading

void setup()

{

  Serial.begin(9600);
  for (int thisReading = 0; thisReading < numReadings; thisReading++) //This need to be
  in the set-up section to avoid resetting the array in the loop
    readings[thisReading] = 0; // initialize all the readings in the
    array to 0

}

void loop(){
  analogValue = analogRead(loadCell);
  rollingReading();
  Serial.print(analogValue);
  Serial.print(", ");
  Serial.println(rollingAverage);
  delay(500);

}
```

```

void rollingReading() {
  total= total - readings[index];      // subtract the last reading
  readings[index] = analogRead(loadCell);  // read from the sensor
  total= total + readings[index];        // add the reading to the total:
  index = index + 1;                    // advance to the next position in the array:
  if (index >= numReadings)              // if we're at the end of the array wrap around to the
beginning
  index = 0;
  rollingAverage = total / numReadings;
  // Serial.println(rollingAverage);
  delay(1);                             // delay in between reads for stability
}

```